

**ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE FIN DE  
CONDICIÓN DE RESIDUO DE LAS ESCORIAS DE FUNDICIÓN DE  
HORNO DE ARCO ELÉCTRICO -ACERO AL CARBONO, COBRE Y  
SILICOMANGANESO- PARA SU USO COMO ÁRIDO (EN  
APLICACIONES LIGADAS Y NO LIGADAS) Y OTROS USOS: COMO  
MATERIA PRIMA EN LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE  
CONSTRUCCIÓN (CEMENTO Y CLÍNKER) Y COMO MATERIAL  
ABRASIVO**

JULIO 2021

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN EJECUTIVO .....                                     | 7  |
| 1. INTRODUCCIÓN .....                                       | 18 |
| 1.1 ANTECEDENTES .....                                      | 18 |
| 1.2 OBJETO Y ALCANCE .....                                  | 21 |
| 2. GLOSARIO .....   | 23 |
| 3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO .....                          | 26 |
| 4. MARCO NORMATIVO O REGULADOR DEL USO DE LAS ESCORIAS..... | 30 |
| 4.1 EN ESPAÑA .....   | 30 |
| 4.1.1 País vasco.....                                       | 30 |
| 4.1.2 Cantabria .....                                       | 37 |
| 4.1.3 Cataluña.....   | 43 |
| 4.1.4 Conclusiones.....                                     | 46 |
| 4.2 EN EUROPA.....  | 47 |
| 4.2.1 Francia .....   | 48 |
| 4.2.2 Países Bajos .....                                    | 55 |
| 4.2.3 Alemania.....   | 61 |
| 4.2.4 Flandes.....  | 65 |
| 4.2.5 Italia .....  | 68 |
| 4.2.6 Suiza.....  | 71 |
| 4.2.7 Reino Unido .....                                     | 73 |
| 4.2.8 Conclusiones.....                                     | 74 |
| 4.3 ESTUDIO DEL JOINT RESEARCH CENTRE (JRC).....            | 76 |
| 4.4 ESTUDIO DE LA COMISIÓN EUROPEA .....                    | 82 |
| 4.5 OTROS ESTUDIOS .....                                    | 84 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.    | ESCORIAS DE ACERO AL CARBONO DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.....   | 86  |
| 5.1   | ESCORIA NEGRA .....  | 87  |
| 5.1.1 | Proceso productivo.....  | 87  |
| 5.1.2 | Características y composición .....  | 88  |
| 5.1.3 | Tratamiento y valorización de las escorias negras .....  | 91  |
| 5.1.4 | Aplicaciones.....  | 95  |
| 5.1.5 | Consideraciones ambientales y sobre la salud humana.....   | 114 |
| 5.2   | ESCORIA BLANCA.....  | 123 |
| 5.2.1 | Proceso productivo.....  | 123 |
| 5.2.2 | Características y composición .....  | 123 |
| 5.2.3 | Tratamiento y valorización de las escorias blancas.....  | 125 |
| 5.2.4 | Aplicaciones.....  | 127 |
| 5.2.5 | Consideraciones ambientales y sobre la salud humana.....   | 132 |
| 6.    | ESCORIA DE SILICOMANGANESO .....   | 137 |
| 6.1   | PROCESO PRODUCTIVO .....   | 137 |
| 6.2   | CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN.....   | 139 |
| 6.3   | TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE SILICOMANGANESO .....  | 141 |
| 6.4   | APLICACIONES .....   | 141 |
| 6.4.1 | Uso como árido. Aplicaciones no ligadas de la escoria de silicomanganeso .....                                   | 142 |
| 6.4.2 | Uso como árido. Aplicaciones ligadas de la escoria de silicomanganeso .....                                      | 147 |
| 6.4.3 | Otros usos.....  | 149 |
| 6.5   | CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y SOBRE LA SALUD HUMANA.....   | 159 |
| 6.5.1 | Uso como árido en aplicaciones no ligadas.....   | 159 |
| 6.5.2 | Uso como árido en aplicaciones ligadas y como materia prima en la fabricación de productos de construcción ..... | 165 |
| 7.    | ESCORIA DE COBRE .....   | 170 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.1   | PROCESO PRODUCTIVO .....  | 171 |
| 7.2   | CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN.....  | 174 |
| 7.3   | TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE COBRE .....                               | 176 |
| 7.4   | APLICACIONES.....   | 176 |
| 7.4.1 | Uso como árido en aplicaciones no ligadas de la escoria de cobre .....                  | 178 |
| 7.4.2 | Otros usos de la escoria de cobre .....   | 180 |
| 7.5   | CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y SOBRE LA SALUD HUMANA.....                                | 187 |
| 7.5.1 | Uso como árido. Aplicaciones no ligadas de la escoria de cobrer .....                   | 189 |
| 7.5.2 | Otros usos.....   | 200 |
| 8.    | REQUISITOS NORMATIVOS O ESTÁNDARES.....   | 206 |
| 8.1   | REGLAMENTO DE PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN.....   | 206 |
| 8.2   | REGLAMENTO REACH.....   | 211 |
| 8.3   | NORMATIVA DE PROTECCIÓN FRENTE A LA EXPOSICIÓN LABORAL A SUSTANCIAS CANCERÍGENAS<br>213 |     |
| 8.4   | NORMATIVA DE APLICACIÓN .....   | 215 |
| 8.4.1 | Uso como árido en aplicaciones no ligadas.....  | 220 |
| 8.4.2 | Uso como árido en aplicaciones ligadas.....   | 223 |
| 8.4.3 | Uso como materia prima en la fabricación de productos de construcción .....             | 231 |
| 8.5   | NORMAS EUROPEAS .....   | 235 |
| 8.5.1 | Normas técnicas .....   | 235 |
| 8.5.2 | Normas relativas a sustancias peligrosas en productos de la construcción .....          | 237 |
| 8.5.3 | Normas relativas a la toma de muestras de áridos y residuos.....                        | 240 |
| 9.    | ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO.....              | 242 |
| 9.1   | CONCLUSIONES DEL GRUPO DE TRABAJO Y APORTACIONES DE LAS CCAA .....                      | 242 |
| 9.2   | ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO .....       | 244 |
| 10.   | CONCLUSIONES .....  | 260 |

11. BIBLIOGRAFÍA..... 269

### ANEXOS

ANEXO I. PROPUESTA DE CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO DE LAS ESCORIAS DE ACERO AL CARBONO ..... 1

ANEXO II. PROPUESTA DE CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO DE LAS ESCORIAS DE SILICOMANGANESO..... 1

ANEXO III. PROPUESTA DE CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO DE LAS ESCORIAS DE COBRE ..... 1

ANEXO IV. ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN ..... 1

ANEXO V. MÉTODOS DE ENSAYO NORMALIZADOS ..... 1

ANEXO VI. VALORES LÍMITE DE LIXIVIACIÓN ESTABLECIDAS EN LA NORMATIVA DE VALORIZACIÓN DE ESCORIAS DE LAS CCAA Y DE LOS EEMM REVISADOS ..... 4

ANEXO VII. RESUMEN DE LOS REQUISITOS REGULADOS EN LAS NORMAS DE VALORIZACION DE ESCORIAS DE PAÍS VASCO, CATALUÑA Y CANTABRIA ..... 5

ANEXO VIII. RESUMEN DE LOS REQUISITOS REGULADOS EN LA NORMATIVA/GUÍAS QUE ABORDAN EL USO DE ESCORIAS TRATADAS DE FUNDICIÓN DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO COMO MATERIAL DE LA CONSTRUCCIÓN EN LOS DISTINTOS EEMM ..... 6

## RESUMEN EJECUTIVO

### ANTECEDENTES

La situación legal de la escoria y su clasificación como residuo, producto o subproducto ha estado sujeta a discusión desde hace más de 25 años, lo que ha provocado que esta clasificación no sea uniforme en los diferentes Estados Miembros, pudiendo ser reconocidas como subproductos o productos en ciertos países bajo el amparo del marcado CE o continuar bajo el estatus de residuo en otros.

A petición de UNESID<sup>1</sup> en el año 2015, la entonces Dirección General de Calidad, Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) llevó a cabo un estudio en el que se analizó la posible desclasificación de la escoria como residuo bajo las dos figuras existentes (subproducto o fin de condición de residuo (FcR)), entre cuyas conclusiones se recomendaba aplicar el concepto de FcR en base a las comunicaciones de la Comisión Europea; si bien esta apreciación no se consideró concluyente debido a las diferentes interpretaciones existentes en los distintos EEMM.

Posteriormente, durante los años 2016 y 2017, distintas agrupaciones y empresas del sector siderúrgico solicitaron a la Comisión de Coordinación en materia de residuos del Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO), actual Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), la declaración como subproducto de ciertas escorias: escorias de horno de arco eléctrico -acero, cobre y silicomanganeso (SiMn).

Las conclusiones de estos estudios fueron evaluadas por dicha comisión en la reunión del Grupo de Trabajo de subproductos y fin de condición de residuo, celebrada el día 27 de noviembre de 2019. Los miembros del Grupo de Trabajo consideraron adecuado, en general, evaluar las diferentes solicitudes de escorias como subproducto recibidas, en un único expediente de fin de condición de residuo que englobase los distintos tipos de escoria y usos.

Esta decisión coincide con las recomendaciones del documento *Study to Assess Member States (MS) Practices on By-Product (BP) and End-of-Waste (EoW)*, de abril de 2020 de la Comisión Europea, en el que se concluye que, aunque algunos pocos tipos de escorias, como las escorias de alto horno o algunas escorias tratadas podrían ser consideradas como subproductos, se propone establecer estándares comunes a nivel europeo para cada tipo de escoria, bajo la figura de FcR. Independientemente del enfoque adoptado, en dicho estudio se señala la necesidad de tener en cuenta los posibles impactos al medio ambiente y a la salud de las personas derivados del contenido de sustancias peligrosas, especialmente los metales pesados.

Para analizar si procede establecer criterios de fin de condición de residuo de las escorias de fundición de horno de arco eléctrico -acero, cobre y SiMn- para su uso como material de construcción en determinadas aplicaciones ligadas y no ligadas y como materia prima en la fabricación de productos de la construcción y, en su caso, proponer los criterios correspondientes, se ha llevado a cabo el presente estudio.

---

<sup>1</sup> Asociación de Empresas Productoras de Acero y de Productos de Primera Transformación del Acero de España.

Para ello, en primer lugar, se ha analizado el marco regulatorio español de gestión de las escorias, así como el marco regulatorio europeo de los áridos reciclados, que incluyen a varios tipos de escorias dentro de su ámbito. A continuación, para cada tipo de escoria se evaluó el proceso productivo en el que se genera, su composición, así como el tratamiento necesario para obtener un material granular con una adecuada calidad en términos de estabilidad volumétrica y tamaño granulométrico en función de su uso final.

Así mismo, para cada uno de los tres tipos de escorias, se han analizado las posibilidades y condiciones de utilización de las escorias -acero al carbono, cobre y silicomanganeso, en función de su viabilidad técnica, para lo cual se llevó a cabo una recopilación de la normativa de aplicación existente para cada uno de los usos evaluados, teniendo siempre presente los posibles impactos para la salud humana y el medio ambiente derivados de su uso.

## MARCO NORMATIVO VALORIZACIÓN ESCORIAS

Si bien no existe una normativa comunitaria que regule específicamente el uso de las escorias como material de construcción, su régimen jurídico viene configurado en determinadas CCAA que regulan la valorización y utilización de cierto tipo de escorias, por medio de sus respectivos decretos, y a nivel europeo, por distintas normativas o guías que abordan el uso de áridos derivados de residuos, entre los que se encuentran las escorias.

En el marco normativo nacional, tres CCAA, que se corresponden con País Vasco, Cataluña y Cantabria, han desarrollado normativa que regula el régimen jurídico aplicable a la gestión y valorización de escorias de acería, concretamente, de las escorias negras procedentes de la fabricación de acero al carbono en hornos de arco eléctrico. Solo Cantabria considera otros tipos de escoria, como las escorias blancas de acero al carbono y las escorias de silicomanganeso. Ninguna regula la valorización y uso de las escorias de cobre.

En todas ellas se permite el uso de la escoria negra como árido en obra civil, tanto en aplicaciones no ligadas (como zahorra en capas de firme, rellenos, etc.), como aplicaciones ligadas (fabricación de hormigón, mezclas bituminosas, morteros, etc.), así como materia prima en la fabricación de productos de la construcción (como adición en la fabricación de cemento o como materia prima o adición en la fabricación de clínker). También se incluye el uso de la escoria en vertederos (cubrición y pistas provisionales).

Entre las condiciones de uso, todas establecen un espesor máximo de aplicación en la construcción de carreteras y la necesidad de garantizar cierta capacidad de impermeabilización en todo tipo de aplicaciones. Únicamente País Vasco establece valores límite de contenido total de metales para aquellas aplicaciones que impliquen contacto directo con suelo, mientras que todas establecen valores límite de lixiviación para las aplicaciones no ligadas, de acuerdo con la norma UNE-EN 12457-4:2003. *Caracterización de residuos. Lixiviación.*

Dichos valores coinciden con los criterios de aceptación de residuos inertes en vertederos, excepto el contenido en fluoruros que presenta un valor superior de 18 mg/kg en el decreto de Cataluña y País Vasco, respecto al valor de 10 mg/kg. Además, País Vasco ha establecido un valor límite para el vanadio y para el cromo (VI), así como valores más permisivos de todos los elementos en aquellas aplicaciones que cuentan con capa totalmente impermeable.



Para el control de estos valores límite, en todas las normas se establece una frecuencia de muestreo, variable en función de la cantidad de escoria producida y de la conformidad de los resultados analíticos en el tiempo (permitiendo una menor frecuencia si se mantienen por debajo de los valores límite).

En el caso de las aplicaciones ligadas, País Vasco no establece valores límite y en Cantabria se señala que podrán no ser de aplicación, ya que se considera acreditada su no afección al medio. Cataluña considera este tipo de aplicaciones como subproducto, prescindiendo también de estas limitaciones.

Además de estos requisitos de carácter ambiental, País Vasco requiere la realización de un ensayo para el control de la expansividad de la escoria negra y en Cantabria se hace referencia a este ensayo a través de la instrucción técnica del hormigón. Por último, tanto País Vasco como Cantabria indican la necesidad de disponer del marcado CE en aquellos usos para los que resulte exigible por la legislación europea de aplicación.

En el ámbito europeo, diferentes EEMM han desarrollado normativa que regula o guías que abordan el uso de áridos derivados de residuos para ser usados como materiales de construcción, entre los que se encuentran determinados tipos de escorias.

La mayoría de EEMM regulan o abordan el uso de la escoria negra, como es el caso de Francia, Países Bajos, Alemania, Italia, Suiza y Reino Unido. Alemania y Países Bajos regulan también el uso de la escoria de cobre. Flandes por su parte regula el uso de cualquier tipo de escoria de fundición. Países Bajos, Flandes (Bélgica) y Alemania, regulan de forma general el uso de los materiales de construcción, entre los que se contemplan los residuos minerales como los áridos reciclados o artificiales; mientras que el resto regula de manera específica el empleo de estos residuos como material de la construcción a través de guías (Francia, Italia y Suiza) o a través de protocolos de calidad como Reino Unido.

De manera genérica se puede considerar que, al igual que en las normas de valorización de escorias en España, los distintos EEMM han definido escenarios de uso que contemplan tanto el uso como árido en aplicaciones ligadas y no ligadas, como materia prima para la fabricación de productos de construcción, estableciendo condiciones de uso (valores límite, empleo bajo determinadas condiciones de impermeabilización, protección de las zonas de agua, etc.) que son más estrictas en el caso de las aplicaciones no ligadas. De manera particular para las aplicaciones no ligadas, en el caso de Francia, Alemania y Suiza, al igual que en las normas de valorización de País Vasco y Cataluña, se requiere el empleo de la escoria bajo una capa que garantice cierta capacidad de impermeabilización y, en caso de que no sea posible dicha capa, se exigen condiciones de uso más restrictivas que abarcan desde la prohibición de su uso en zonas de especial protección hasta su utilización con medidas de protección específicas.

La mayoría de los países exigen cumplir con ciertos valores límite de lixiviación de compuestos inorgánicos en las escorias, excepto Italia que limita también compuestos orgánicos (COD).

Países Bajos requiere asimismo valores límite de composición de compuestos orgánicos y Flandes de compuestos orgánicos e inorgánicos. Reino Unido no especifica valores límite.

Los países que regulan el uso de las escorias como residuo, requieren que las pruebas de lixiviación se realicen conforme a la norma UNE 12457 (ensayo de volteo), mientras que los países que regulan de forma general el empleo de materiales de la construcción, entre los que se incluyen materiales residuales, como Países Bajos, Alemania y Flandes, establecen ensayos de lixiviación en columna.

Excepto en el caso de Alemania, Italia y Suiza que requieren ensayos en columna con una relación L/S < 10 L/kg, se puede considerar que los valores límite establecidos tanto para ensayos de volteo como para ensayos de columna con una relación L/S de 10 L/kg, se encuentran en el mismo orden de magnitud.

Finalmente, la mayoría de los países exige establecer un sistema de gestión de calidad que permita comprobar el cumplimiento de los requisitos técnicos y ambientales establecidos.

### **ESCORIAS TRATADAS COMO MATERIAL DE LA CONSTRUCCIÓN**

Las escorias pueden tener su origen en procesos de fundición ferrosos y no ferrosos que generan, en función del tipo de proceso, diferentes escorias. Las diferentes variedades de productos fabricados, así como el tipo de chatarra introducida en el inicio del proceso productivo, propician la formación de escorias con diferente composición y con características y propiedades distintas.

En la naturaleza, los minerales como el hierro, el cobre, el manganeso, el aluminio y otros metales se encuentran en estado impuro, a menudo oxidados y mezclados con silicatos de otros metales. Durante la fundición, cuando la mena está expuesta a altas temperaturas, estas impurezas se separan del metal fundido y se pueden retirar.

El conjunto de compuestos que se retira del mineral constituye la escoria, que se puede considerar como una mezcla de óxidos metálicos y otros compuestos como sulfuros y metales pesados que se van generando durante las diferentes fases del proceso pirometalúrgico, cuya formación comienza con la primera etapa de reducción y purificación de los metales a partir de minerales naturales y/o reciclados metálicos o chatarras. Aunque de manera general las escorias suelen utilizarse como un mecanismo de eliminación de impurezas en la fundición del metal, también pueden servir para otros propósitos, como ayudar en el control de la temperatura durante la fundición y minimizar la reoxidación del metal líquido final antes de pasar al molde.

Las escorias, tras un adecuado tratamiento, pueden ser valorizadas como material alternativo de construcción en diferentes aplicaciones que pueden agruparse en dos amplios grupos: como árido en aplicaciones no ligadas (zahorra artificial, rellenos o balasto de vías férreas) y aplicaciones ligadas (mezclas bituminosas, fabricación de hormigón, morteros); y otros usos: como materia prima en la fabricación de productos de la construcción (fabricación de clinker) o como material abrasivo (únicamente para la escoria de cobre).

El tratamiento de las escorias para estas aplicaciones puede comprender acciones que alteren las propiedades físicas de la escoria, las propiedades químicas o ambas.

Los tratamientos identificados son generalmente tratamientos específicos de estabilización, meteorización o envejecimiento (sólo en el caso de las escorias de acería) por riego con agua (enfriamiento lento que propicia

una estructura cristalina en la escoria), por aire (enfriamiento lento que da lugar a escorias con mayor porosidad) o por inmersión directa en el agua; retirada de restos metálicos; tratamientos físicos como la trituración o el cribado para alcanzar los tamaños de grano requeridos en función del uso posterior y, paso previo a la expedición del material, la caracterización para comprobar tanto la calidad técnica como la conformidad ambiental. En función del tipo de escoria, estos tratamientos pueden darse al completo o no, o con mayor o menor intensidad.

Tras la valorización, las escorias pueden llegar a cumplir con las especificaciones técnicas de los usos propuestos.

## VIABILIDAD TÉCNICA

Diversos estudios técnicos confirman la viabilidad técnica de las escorias tratadas para diversos usos, que se constata por el cumplimiento de los requisitos y especificaciones establecidas en la normativa correspondiente en función del uso posterior o de la experiencia previa (especialmente en el caso de la escoria negra), si bien cabe señalar ciertas singularidades:

### Escoria negra

- Árido en aplicaciones no ligadas: en la construcción de carreteras como zahorra en capas granulares en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras, terraplenes y rellenos o en la construcción de vías de ferrocarril (sub-balasto).
- Árido en aplicaciones ligadas: fabricación de hormigones, en morteros y como árido en capa de rodadura en mezclas bituminosas, siempre que se alcance una determinada finura de tamaño de grano a través de una adecuada molienda y/o mediante la adición de árido fino calizo, debido a la falta de finos en las escorias.
- Como materia prima en la fabricación de productos de construcción: fabricación de clínker.

Uno de los parámetros clave a controlar es el contenido de compuestos potencialmente expansivos, como CaO y MgO libres, que pueden implicar fenómenos de inestabilidad de volumen a corto y medio-largo plazo, respectivamente, motivo por el que el CEDEX no recomienda su uso en capas estabilizadas con cemento (gravacemento). Por ello, esta propiedad debe analizarse previamente para cada tipo de escoria mediante ensayos de expansión, delimitando los umbrales de expansión de los lotes, y contrastando los valores límite admisibles establecidos para el tipo de aplicación y/o prescripciones técnicas del pliego en cada caso.

### Escoria blanca

La **escoria blanca** tratada, debido a sus características, es utilizada únicamente como materia prima en la fabricación de productos de construcción; concretamente en las fábricas de cemento en sustitución de la marga en la fabricación de clínker, confirmado por años de experiencia industrial.

La utilización de escorias blancas en cementeras es viable, por lo general, en porcentajes de dosificación no mayor del 5%, pudiendo llegar hasta el 15%, según distintas fuentes consultadas.

El elemento limitante principal de estas dosificaciones es el magnesio debido a su potencial expansivo, por lo que es necesario controlar el contenido de MgO, no debiendo exceder por lo general el 5% de MgO, así como el contenido en fluoruros, según especificaciones de la cementera.

### Escorias de SiMn

- Árido en aplicaciones no ligadas: como zahorra en la construcción de firmes, como capa base/subbase, únicamente en firmes de categoría de tráfico T3, T4 (tráfico bajo). Se requiere que la escoria de SiMn sea mezclada con otro tipo de materiales (al menos un 25 % de árido fino) o se someta a un proceso adecuado de machaqueo o cribado para poder cumplir ciertas especificaciones definidas en el PG-3, como el contenido de azufre, los husos granulométricos y la resistencia a la fragmentación.
- Árido en aplicaciones ligadas: para la fabricación hormigón, se puede utilizar hasta un 100 % de árido (fino y grueso) de escorias de SiMn.
- Como materia prima en la fabricación de productos de la construcción:
  - como adición activa (material puzolánico) en la fabricación de cemento, en un porcentaje máximo del 30 % aunque los estudios recomiendan adicionarlas como componente minoritario hasta un 5% en peso de cemento hasta que se homologue su utilización como componente principal en la normativa correspondiente. Adicionalmente, la escoria deber ser llevada a una finura aceptable (6.600 de finura Blaine).
  - como materia prima en la fabricación de clínker como aporte de CaO: según pruebas industriales recientes, se recomienda una dosificación máxima de la escoria de SiMn del 3% y a su vez, un contenido máximo de MnO en las escorias del 8% y del 5% en humedad, para evitar problemas de carácter técnico.

### Escoria de cobre

La **escoria de cobre** tratada, por su parte, se puede utilizar como árido de relleno para cama de tubería en aplicaciones no ligadas, como materia prima en la fabricación de productos de la construcción, concretamente como corrector de hierro (componente minoritario) en la fabricación de clínker y como material abrasivo.

## **MARCO NORMATIVO REGULADOR APLICACIONES CONSTRUCCIÓN**

Muchas de las aplicaciones reguladas en la normativa de aplicación de obras en carreteras y obra civil, permiten el uso de áridos reciclados y/o áridos de origen industrial como material alternativo a los materiales pétreos, entre los que se incluyen las escorias procedentes de procesos de fundición ferrosos como las escorias negras y blancas. En concreto, tanto el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*, la *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*, la *Instrucción para la recepción de cementos (RC-16)*, así como varias normas UNE EN armonizadas, han introducido en su articulado la posibilidad de emplear árido artificial como árido alternativo, con el fin de fomentar el aprovechamiento y/o reutilización de residuos, teniendo en cuenta su viabilidad técnica.

De manera general, en esta normativa se permite el uso de los materiales secundarios en algunas aplicaciones, pero sin desarrollar ninguna condición específica. Únicamente debe cumplir lo exigido al material habitual, que sus características físico-químicas aseguren la estabilidad futura del conjunto y, en todo caso, que se esté a lo dispuesto en la legislación vigente en materia medioambiental, de seguridad y salud, y de almacenamiento y transporte de productos de construcción.

Estas normas no contemplan de forma explícita aquellas que tienen su origen en procesos de fundición no ferrosos, como las escorias de cobre o de silicomanganeso. En este caso, la viabilidad técnica de estas escorias para los diversos usos se justifica, además de en diversos artículos científicos u otros estudios, en documentos de referencia como en la Guía Tecnológica. Directiva 96/61 relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Epígrafe 2.5. Ferroaleaciones del Ministerio de Industria y Energía o en el Documento de referencia BREF de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales No Férreos.

En el caso específico de la escoria negra de acería, el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) por medio de la Nota Técnica NT 03/2020<sup>2</sup> proporciona directrices técnicas sobre el empleo de áridos siderúrgicos procedentes del tratamiento de la escoria negra, en especial en el campo de las mezclas bituminosas para su utilización como árido en capa de rodadura.

Adicionalmente, existen numerosas normas UNE para los productos de la construcción que regulan las propiedades que deben cumplir, los métodos de ensayo para su determinación, procedimientos para el control de calidad, etc., para las diferentes aplicaciones en las que se pueden emplear las escorias objeto de estudio.

Del mismo modo, como cualquier producto de la construcción, las escorias se encontrarían incluidas en el ámbito del *Reglamento de Productos de la Construcción*, debiendo ser avaladas mediante el marcado CE en aquellos usos para los que resulte exigible.

Según la información consultada, la mera mención a las condiciones de utilización de las escorias en buena parte de las normas técnicas europeas prueba la existencia de un mercado permanente y recurrente que garantiza el uso de estas. Además, en el caso de las escorias objeto de estudio, existe un mercado o demanda para la utilización de las escorias como material de construcción, certificada mediante acuerdos y pedidos adjuntados en las solicitudes de declaración como subproducto previas y que conciernen a los principales productores de escorias nacionales, así como a múltiples receptores con capacidad de absorber buena parte del flujo de estos residuos.

No obstante, en España la competencia con materiales naturales puede ser fuerte debido a la cercanía a canteras naturales de gran calidad y tamaño, factor que junto a la distancia entre la instalación de producción y el cliente puede comprometer su utilización.

---

<sup>2</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

## CONSIDERACIONES AMBIENTALES

En relación con los impactos al medio ambiente o a la salud de las personas derivados del uso de las escorias, es preciso controlar la posible afección al suelo y a las aguas subterráneas derivada de la aplicación de éstas, de forma que su desclasificación como residuo y su consideración como producto no entrañe un riesgo inaceptable para el medio ambiente y la salud humana.

Pese a que la mayor parte de los valores detectados en el lixiviado de las escorias en función de las analíticas disponibles, se encuentran, de manera general, por debajo de los valores límite de referencia, el hecho de que la mayor parte de los EEMM que han desarrollado normas o guías que regulan el uso de las escorias, así como los decretos de País Vasco, Cantabria y Cataluña, hayan establecido medidas adicionales de control en su empleo como árido en aplicaciones no ligadas, pone de manifiesto que, debido a las características físicas y químicas de las escorias, es preciso controlar la posible afección al suelo y a las aguas subterráneas, especialmente en este tipo de usos.

En concreto, establecen una serie de condicionantes y restricciones de uso, valores límite de contenido total y del lixiviado, empleo bajo determinadas condiciones de impermeabilización, etc., así como la necesidad de implantar procedimientos de control de calidad que permitan verificar el cumplimiento de estas condiciones. Países como Alemania señalan específicamente que, incluso si las escorias son clasificadas como subproducto (y por tanto ya no se consideran residuo), su potencial daño al medioambiente requiere la obligación de imponer medidas de control de calidad. Por otra parte, todos los países en los que se ha regulado el uso de la escoria tratada como árido alternativo en actividades de la construcción. han establecido restricciones de uso relativas a la protección de aguas subterráneas o superficiales.

De manera particular en las aplicaciones no ligadas, en el caso de Francia, Alemania y Suiza, al igual que en las normas de valorización de País Vasco y Cataluña, se requiere el empleo de la escoria bajo una capa que garantice cierta capacidad de impermeabilización y, en caso de que no sea posible dicha capa, se exigen condiciones de uso más restrictivas que abarcan desde la prohibición de su uso en zonas de especial protección hasta su utilización con medidas de protección específicas o, en el caso concreto de Alemania, o bien se requiere alcanzar valores límite más restrictivos que los exigidos para unidades de obra con capa totalmente impermeable o, directamente, se restringen dichos usos.

Es decir, para aquellas aplicaciones no ligadas en las que no se puede garantizar una impermeabilización total, los países evaluados han optado o bien por establecer condiciones de uso más restrictivas junto con valores límite más bajos o bien se han restringido dichos usos, porque pueden implicar mayor riesgo potencial de generar una afección al medio.

Esta conclusión está en consonancia con lo establecido en un estudio del CEDEX en el que se evaluaron las posibilidades de utilización de determinados residuos en terraplenes, en el que se concluye que, en función del tipo de residuo, puede ser habitual que, por condicionantes de tipo ambiental, se excluya el uso de las escorias en las zonas de coronación, espaldones y cimiento que actúan como envoltorio del núcleo y en las que no se puede garantizar esta impermeabilización.

En determinadas circunstancias más sensibles, como en aplicaciones fuera de los escenarios regulados y en áreas con protección a las aguas subterráneas y el medio natural, es práctica común plantear la necesidad de elaborar un Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) que identifique los niveles de riesgo para receptores en el emplazamiento y en el entorno.

Los compuestos y elementos que potencialmente pueden liberarse al medio son metales pesados y sustancias inorgánicas cuyo contenido variará en función de las materias primas utilizadas en el proceso productivo y, en el caso de las escorias negras de acería, especialmente, del tipo de chatarra introducida.

La liberación de estas sustancias y sus posibles impactos ambientales son diferentes en función de su uso ulterior y del pH, pudiendo calificar esta posibilidad como baja en aquellas aplicaciones en las que la escoria se presenta embebida en una matriz, es decir, en las aplicaciones ligadas (fabricación de hormigón, mezclas bituminosas, morteros) o en los usos como materia prima para la fabricación de productos de la construcción (fabricación de cemento y clínker). En este sentido, ninguna de las normativas revisadas, establecen valores límite para este tipo de aplicaciones. No obstante, para los usos como materia prima en la fabricación de cemento o para aquellas aplicaciones ligadas que impliquen el uso de cemento o de sus preparados, deberá tenerse en cuenta la *Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio*, que limita el contenido de cromo (VI) en el cemento y en los preparados que contienen cemento a 2 ppm.

En relación con el empleo de las escorias tratadas como árido en aplicaciones no ligadas, únicamente se podría garantizar, siempre y cuando se estableciesen medidas adicionales de control, como el establecimiento de condicionantes y restricciones de uso, valores límite de composición y de lixiviación y/o controles de calidad. Así mismo, deben tenerse en cuenta las siguientes singularidades en cada tipo de escoria:

La escoria negra posee cierto contenido en hierro, manganeso, aluminio, magnesio y titanio procedente de sus componentes principales. También se evidencia una notable presencia de bario, boro, cobre, vanadio, zinc, cromo y azufre entre sus componentes minoritarios. Los resultados analíticos sobre el lixiviado de la escoria negra muestran contenidos inferiores a los valores límite establecidos en la distintas normas nacionales e internacionales de referencia, exceptuando el mercurio, el molibdeno, el selenio y los fluoruros, que superan alguno de estos límites. La mayoría de los documentos consultados recomiendan controlar la lixiviación de estos cuatro elementos en la escoria negra, y también del vanadio, bario y el cromo.

La escoria blanca se compone principalmente de óxido de calcio, en valores entre 45-65% en peso, seguido por orden por el dióxido de silicio, el óxido de aluminio y óxido de magnesio y se caracteriza por su bajo contenido en metales pesados, existiendo trazas de algunos productos metálicos críticos como el plomo, níquel, cadmio, zinc, cobre, arsénico o mercurio. La escoria se estabiliza formando estructuras vítreas hasta en un 98% de su composición cuando se enfría con agua, lo que constataría su baja capacidad de lixiviación, aunque ciertos documentos indican cantidades apreciables de bario en su lixiviado.

La escoria se SiMn se compone principalmente de sílice, cal, alúmina, óxido de manganeso y magnesio, representando la suma de estos componentes casi el 90 % de su composición química. Los estudios de caracterización de la escoria y de su lixiviado indican concentraciones de metales pesados inferiores a los

valores límite establecidos en el *Decreto 100/2018, de 20 de diciembre*, de Cantabria y a los valores de la normativa VLAREMA de Flandes, normativas que regulan el uso de estas escorias.

Aquellos parámetros que podrían presentar mayor problemática desde el punto de vista ambiental según los ensayos de disponibilidad máxima y la comparativa realizada con la normativa de protección de aguas subterráneas y superficiales (análisis realizado para obtener información orientativa en los escenarios más desfavorables), son selenio, zinc, níquel, bario, cloruros, fluoruros y sulfatos, así como antimonio, cromo, mercurio y molibdeno. Por último, los ensayos de dependencia de pH evidencian cambios en el comportamiento del lixiviado de la escoria de SiMn en función del pH, siendo predominante un aumento de la lixiviación de la mayoría de los metales cuanto más ácido es el medio.

La escoria de cobre tiene un gran contenido de hierro y sílice procedente de sus componentes principales. También se evidencian concentraciones notables de cobre, zinc y aluminio y, en menor medida, de arsénico y plomo. Diversas fuentes señalan que la escoria de cobre presenta una reducida solubilidad de los metales traza presentes en la matriz debido a las características microestructurales, encontrándose firmemente interconectados entre sí en las estructuras de vidrio del silicato y otras fases minerales. Sin embargo, según los resultados analíticos de los ensayos de columna, parámetros como cobre, molibdeno y antimonio presentan cierta capacidad de lixiviación que podría, en algún caso, ser superior a los valores límite considerados como referencia.

Teniendo en cuenta el escenario de aplicación que supone el empleo como árido para el relleno en zanjas de tubería (en el que existe una cierta probabilidad de fuga o rotura que podría incrementar el riesgo de lixiviación al entrar en contacto con agua), así como su consideración en otros EEMM, como Flandes, en el que el uso de la escoria de cobre en rellenos es minoritario frente a su empleo en aplicaciones ligadas, el uso de la escoria de cobre como árido para el relleno de zanjas para la instalación de tuberías no se puede considerar seguro.

En cuanto al uso como material abrasivo, la escoria de cobre puede romper las estructuras de vidrio del silicato provocando la liberación de metales pesados como arsénico, cromo y plomo, pudiendo superar los límites de exposición dictados por la OSHA. Por ello, se considera imperativo la necesidad de implantar un sistema de gestión de seguridad y salud que garantice el cumplimiento de las obligaciones sobre salud y seguridad en el trabajo y reduzca la posible afección a la salud humana y al medio ambiente durante las actividades de abrasión con escoria de cobre.

## CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis detallado del cumplimiento de las condiciones necesarias para el establecimiento de los criterios de fin de condición de residuo para las escorias objeto de estudio. Como resultado de toda esta valoración se ha determinado que:

- Se dispone de un marco normativo estatal y europeo que regula el uso de las escorias tratadas como material de la construcción.



- El marco normativo que regula la utilización de áridos naturales como material de la construcción ha impulsado la introducción del árido reciclado y artificial, entre los que se incluyen cierto tipo de escorias, como árido alternativo. En este sentido, existe una amplia y completa relación de normas técnicas de referencia y de especificaciones de producto cuyo cumplimiento garantiza la idoneidad de los productos elaborados para el uso final al que están destinados.
- El marco normativo existente ha hecho posible el desarrollo de una actividad empresarial entorno a la utilización de las escorias que promueve la existencia de un mercado o demanda para este tipo de escorias, si bien en España puede existir cierta competencia con materiales naturales p debido a la cercanía a canteras naturales de gran calidad y tamaño, factor que junto a la distancia entre la instalación de producción y el cliente puede comprometer su utilización.
- Las escorias, tras un tratamiento adecuado, pueden ser valorizadas como material alternativo de construcción en diferentes aplicaciones que pueden agruparse en:
  - uso como árido: en aplicaciones no ligadas en la construcción de carreteras como zahorra en capas granulares, en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras, terraplenes y rellenos o en la construcción de vías de ferrocarril (sub-balasto) y aplicaciones ligadas como árido en la fabricación de hormigones, morteros y en mezclas bituminosas como capa de rodadura.
  - otros usos: como materia prima en la fabricación de productos de la construcción (fabricación de cemento y de Clinker) y como material abrasivo para las escorias de cobre.

Pese a la viabilidad técnica de las escorias como árido para la mayor parte de estas aplicaciones, se requiere tener en cuenta ciertas singularidades, como el control de los compuestos potencialmente expansivos en el caso de las escorias de fundición de acero y, debido a la falta de finos, la necesidad de la mezcla con árido fino natural en el caso de las escorias de acero y de SiMn tanto en aplicaciones no ligadas como ligadas.

- En relación con los impactos al medio ambiente o a la salud de las personas derivados del uso de las escorias, se pone de manifiesto que es preciso controlar la posible afección al suelo y a las aguas subterráneas mediante el establecimiento de medidas adicionales tales como condicionantes y restricciones de uso, valores límite de composición y de lixiviación y/o controles de calidad, especialmente en su empleo como árido en aplicaciones no ligadas.

En consecuencia, se puede concluir que el proceso de valorización de las escorias procedentes del horno de arco eléctrico de acero al carbono, silicomanganes y cobre, es una operación de tratamiento de residuos y parece procedente establecer criterios de fin de condición de residuo que aseguren que las escorias, una vez tratadas, cumplen las especificaciones técnicas de producto y pueden usarse sin provocar daños a la salud humana y al medio ambiente, sin necesidad de someterlas al establecimiento de los controles propios del régimen jurídico de los residuos.

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

## 1. INTRODUCCIÓN

La *Directiva Marco de Residuos (DMR) 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos* y su transposición al ordenamiento jurídico español a través de la *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados*, definen unos criterios para establecer el fin de la condición de un residuo, bajo la cual los residuos, tras haber sido sometidos a una operación de valorización, podrían dejar de ser considerados como tal, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- las sustancias u objetos resultantes se usen habitualmente para finalidades específicas,
- exista un mercado o una demanda para dichas sustancias u objetos,
- las sustancias u objetos resultantes cumplan los requisitos técnicos para finalidades específicas, la legislación existente y las normas aplicables a los productos,
- el uso de la sustancia u objeto resultante no genere impactos adversos para el medio ambiente o la salud.

El principal propósito de definir criterios de fin de la condición de residuo es facilitar y promover el reciclaje, garantizando al mismo tiempo un elevado nivel de protección del medio ambiente, reduciendo el consumo de los recursos naturales y la cantidad de residuos enviados a eliminación.

La aplicación de los criterios de fin de condición de residuo a un residuo valorizado para un uso específico implica el cumplimiento de una serie de requisitos relativos al origen y el tipo de residuo sometido a valorización, al tratamiento, y a la calidad final del residuo valorizado, de forma que se garantice que su uso no genera efectos adversos al medioambiente y a la salud humana distintos o adicionales a los que generaría el producto al que pretende o puede sustituir.

La adopción de criterios a nivel europeo se realizará a través del procedimiento de comitología establecido en la propia directiva y, cuando no se hayan establecido criterios a escala comunitaria, los Estados miembros podrán decidir caso por caso si un determinado residuo ha dejado de serlo teniendo en cuenta la jurisprudencia aplicable. Haciendo uso de esta habilitación, el artículo 5 de la *Ley 22/2011, de 28 de julio*, recoge que mediante orden ministerial puedan establecerse los criterios específicos que deben cumplir determinados residuos para que dejen de considerarse como tales.

Este documento técnico es el resultado del encargo efectuado por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) a la Empresa para la Gestión de Residuos Industriales (EMGRISA).

### 1.1 ANTECEDENTES

La situación legal de la escoria y su clasificación como residuo, producto o subproducto ha estado sujeta a discusión desde hace más de 25 años.

El sector siderúrgico nacional y europeo considera que la clasificación de las escorias como residuo no da respuesta a la situación actual de utilización de éstas, por lo que siempre ha sostenido que las escorias

deben ser consideradas como un producto más dentro de los distintos procesos de fundición, que se generan intencionadamente y que cuentan con un mercado estable.

Según manifiesta el sector, la situación de incertidumbre en cuanto a la clasificación de las escorias como residuo ha provocado problemas en sus traslados, tanto a nivel nacional como comunitario, además de los siguientes perjuicios, según la posición y opinión citadas por el sector:

- Diferencias de competitividad del material derivadas de la diferente interpretación del marco normativo de aplicación en las distintas CCAA y/o países miembros.
- Obligación de tramitar en las instalaciones de producción la debida autorización como gestor de residuos, que conlleva distintas inversiones y gastos.
- Obligaciones de documentación y burocracia asociada a la gestión de los residuos.
- Incremento de los costes de gestión y uso del material derivados de aspectos tales como los traslados o la importación/exportación.
- A efectos de comercialización, asociaciones negativas ligadas al término residuo.

Es por ello por lo que, en el año 2015, el sector productivo de determinadas escorias representado por UNESID<sup>3</sup> solicitó a la entonces Dirección General de Calidad, Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) estudiar la posible desclasificación de la escoria como residuo.

La *Directiva Marco de Residuos (DMR) 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos* y su transposición al ordenamiento jurídico español a través de la *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados* definen por un lado las condiciones que debe cumplir un residuo de producción para ser considerado como subproducto, y por otro, las condiciones que debe cumplir un residuo valorizado para que pueda dejar de ser considerado como residuo; ambas figuradas están reflejadas en los artículos 4 y 5 de la *Ley 22/2011, de 28 de julio*, respectivamente.

En un principio, en el caso de estudio de las escorias caben dos posibilidades o consideraciones:

- Las escorias podrían ser consideradas como subproducto desde el momento en que son obtenidas, sea o no necesario su procesamiento.
- Las escorias podrían ser consideradas un residuo inicialmente, que deja de serlo después de llevar a cabo algún tipo de tratamiento (se trata de una valorización conforme a la legislación de residuos).

Debido a estas dos diferentes consideraciones, el entonces MAGRAMA encargó el “*Análisis de la Situación Actual de la Gestión de Escorias del Sector Siderúrgico en la UE y en España y Evaluación del Cumplimiento*”

---

<sup>3</sup> Asociación de Empresas Productoras de Acero y de Productos de Primera Transformación del Acero de España.

de los Requisitos para ser Considerado Subproducto o Desclasificado como Residuo” realizado por EMGRISA en el año 2015.

El estudio tenía por objeto, por una parte, analizar la posibilidad de considerar la desclasificación como residuo de las escorias derivadas de los procesos metalúrgicos de fundición del hierro y del acero para su uso como material de la construcción o para la fabricación de cemento u hormigón, bien a través del concepto del fin de la condición de residuo o de la figura de subproducto y, por otra, identificar y analizar el marco legal aplicable para el uso de las escorias siderúrgicas como material de la construcción, tanto en el ámbito de la normativa de residuos como en la exigida a los productos, así como la normativa específica desarrollada, tanto en España, como en otros EEMM de la UE.

Entre las conclusiones del estudio se recomienda aplicar el concepto de fin de condición de residuo en base a las comunicaciones de la Comisión Europea, aunque esta apreciación no se consideró concluyente debido a las diferentes interpretaciones existentes en los distintos EEMM.

Posteriormente, durante los años 2016 y 2017, distintas agrupaciones y empresas del sector siderúrgico solicitaron a la Comisión de Coordinación en materia de residuos del Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO), actual Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), la declaración como subproducto de ciertas escorias. Concretamente se recibieron las siguientes solicitudes:

- Solicitud 11A: Escorias de silicomanganeso procedentes de la producción de ferroaleaciones para su uso como sustituto en materiales pétreos naturales y zorra en actividades de construcción y obra civil.
- Solicitud 11B: Escorias de silicomanganeso procedentes de la producción de ferroaleaciones para su uso en la fabricación de cemento y hormigón.
- Solicitud 15: Escorias de cobre procedentes de la producción de cobre electrolítico para su uso como corrector de hierro en la fabricación de clínker de cemento.
- Solicitud 19: Escorias de cobre procedentes de la producción de cobre electrolítico para su uso como material de relleno en cama de tubería.
- Solicitud 20A: Escorias negras siderúrgicas procedentes de la producción de acero al carbono mediante horno eléctrico (EAF-C) para su uso como árido ligado.
- Solicitud 20B: Escorias negras siderúrgicas procedentes de la producción de acero al carbono mediante horno eléctrico (EAF-C) para su uso como árido no ligado.
- Solicitud 22: Escorias de cobre procedentes de la producción de cobre electrolítico para su uso como material abrasivo.
- Solicitud 25: Escorias negras siderúrgicas procedentes de la producción de acero para su uso como sustituto de zorra y grava natural en obra civil.
- Solicitud 26: Escoria blanca procedente de la producción de acero para su uso como materia prima en la fabricación de clínker de cemento.

EMGRISA llevó a cabo el estudio de cada una de estas solicitudes de declaración de estos residuos de producción como subproducto para cada una de las aplicaciones identificadas. Las conclusiones de estos estudios fueron evaluadas en el seno de la Comisión de Coordinación en Materia de Residuos, en la reunión del Grupo de Trabajo de subproductos y fin de condición de residuo, celebrada el día 27 de noviembre de 2019.

Entre las conclusiones de la citada reunión, se señaló la intención de evaluar las diferentes solicitudes de escorias como subproducto recibidas, en un único expediente de fin de condición de residuo que englobase los distintos tipos de escoria y usos, aunque no en todos los casos está tan clara su inclusión, independientemente de que el resultado de la evaluación como tal fuese favorable o desfavorable. En estos últimos casos, cuando el resultado de la evaluación sea desfavorable, deberán de permanecer bajo el régimen de residuos. Los miembros del Grupo de Trabajo presentes consideraron, en general, adecuada la figura de fin de condición de residuo para este tipo de materiales.

El presente estudio es el resultado del acuerdo generalizado y de las conclusiones alcanzadas en el citado Grupo de Trabajo.

## 1.2 OBJETO Y ALCANCE

El objeto del presente documento es analizar si procede establecer criterios de fin de condición de residuo a las **escorias de fundición de horno de arco eléctrico -acero al carbono, cobre y silicomanganeso- para su uso como material de construcción en determinadas aplicaciones ligadas y no ligadas**, y como material abrasivo y, en caso de que proceda, proponer los criterios fin de condición de residuo correspondientes.

Para ello, el texto consta de diez capítulos que desarrollan los siguientes contenidos:

1. *Introducción*. Describe la finalidad del documento, así como los antecedentes, los objetivos y el alcance del estudio.
2. *Glosario*. Compuesto de términos y expresiones necesarios para la comprensión del documento.
3. *Justificación del estudio*. Se realiza una breve introducción que contextualiza las escorias generadas en el proceso pirometalúrgico.
4. *Marco normativo o regulador de las escorias*. Se analiza el marco normativo de las tres CCAA que regulan el uso de escorias en España, así como la normativa que regula el uso de áridos derivados de residuos, entre los que se encuentran las escorias, como material de la construcción en varios países de la UE, concretamente en Alemania, Francia, Flandes (Bélgica), Reino Unido, Italia, Países Bajos y Suiza. También se incluye el análisis del estudio del Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea “*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*” de 2014. Se resumen las conclusiones del documento de la Comisión Europea *Study to Assess Member States (MS) Practices on By-Product (BP) and End-of-Waste (EoW)* de 2020.
5. *Escorias de acería de horno de arco eléctrico*. Se analiza el proceso productivo, la composición, el tratamiento, las aplicaciones propuestas para su uso y su viabilidad técnica, y las consideraciones

ambientales y sobre la salud humana, derivadas de la utilización de las escorias de acero al carbono de horno de arco eléctrico, que comprende tanto las escorias procedentes de la metalurgia primaria o fusión (escorias negras), como aquellas generadas en la metalurgia secundaria o de afino (escorias blancas).

6. *Escorias de silicomanganeso.* Se analiza el proceso productivo, la composición, el tratamiento, las aplicaciones propuestas para su uso y su viabilidad técnica, los requisitos normativos de aplicación y las consideraciones ambientales y sobre la salud humana, derivadas de la utilización de las escorias de silicomanganeso.
7. *Escorias de cobre.* Se analiza el proceso productivo, la composición, el tratamiento, las aplicaciones propuestas para su uso y su viabilidad técnica, los requisitos normativos de aplicación y las consideraciones ambientales y sobre la salud humana, derivadas de la utilización de las escorias de cobre.
8. *Requisitos normativos o estándares.* Se recogen las principales especificaciones técnicas identificadas en función del tipo de aplicación, previo análisis del *Reglamento (UE) nº 305/2001, de 9 de marzo*, de productos de la construcción y el *Reglamento (CE) 1907/2006, de 18 de diciembre, REACH*. Por último, se recogen las normas europeas armonizadas identificadas relacionadas con las diferentes aplicaciones en las que pueden emplearse las escorias analizadas en el presente estudio.
9. *Análisis de la aplicación del concepto de fin de condición de residuo.* Se resumen las conclusiones alcanzadas en el Grupo de Trabajo, de 27 de noviembre de 2019, relativo a las escorias, así como las aportaciones de las CCAA tras la celebración de la reunión. También, se lleva a cabo el análisis del cumplimiento de las cuatro condiciones establecidas en la *Ley 22/2011, de 28 de julio*, para que un residuo pueda alcanzar el fin de su condición.
10. *Conclusiones.*
11. *Bibliografía.*

Así mismo, al inicio del documento se adjunta un resumen ejecutivo donde se sintetiza toda la información analizada en el presente documento.

Al final del documento, en los Anexos I, II y III, se realiza una propuesta de criterios para el establecimiento del fin de condición de residuo de las escorias de acero al carbono, silicomanganeso y cobre, respectivamente.

El Anexo IV recopila información sobre los principales factores que afectan a la lixiviación y los tipos de ensayos disponibles para evaluar las propiedades de lixiviación de los áridos. El Anexo V recoge los métodos de ensayo normalizados que los distintos EEMM identificados requieren para el análisis de cada uno de los parámetros propuestos en las normas FcR. En el Anexo VI se presenta un resumen de los valores límite de lixiviación establecidos en la normativa de valorización de escorias de País Vasco, Cataluña y Cantabria, así como en la normativa o guías que regulan el uso de las escorias en los distintos EEMM revisados. Finalmente, los anexos VII y VIII resumen los requisitos establecidos en dichas normas de valorización y la normativa o guías analizadas en los distintos EEMM, respectivamente.

## 2. GLOSARIO

**Acero:** Aleación de hierro y carbono que se produce a partir de la fusión y refinado del arrabio o chatarra de hierro, chatarra de acero o hierro de reducción directa. El contenido de carbono puede variar en un porcentaje entre el 0,002% y el 1,7%. La norma UNE-EN 10020:2001<sup>4</sup> clasifica los tipos de acero según su composición química en aceros no aleados (aceros al carbono), aceros aleados, aceros inoxidables.

**Arrabio:** Fundición de hierro que se obtiene en el alto horno y que constituye la materia prima de la industria del hierro y del acero.

**Aplicación:** Empleo de una determinada cantidad de árido en un sistema de producción de la industria de la construcción a fin de producir un elemento constructivo o unidad de obra específico.

**Aplicaciones ligadas:** Uso de los materiales granulares mezclados con conglomerante (cemento, betún o cualquier otro conglomerante hidráulico, hidráulico-puzolánico o aéreo) que confiere cohesión al conjunto. Estas aplicaciones se caracterizan por la encapsulación de los áridos dentro de una matriz inorgánica.

**Aplicaciones no ligadas:** Uso en el cual los materiales granulares se colocan compactados en (sucesivas) capas para la ejecución de diversas unidades de obra civil, sin que se adicione conglomerante alguno.

**Árido:** Material granular utilizado en la construcción. Los áridos pueden ser naturales, artificiales o reciclados.

**Árido natural:** Árido de origen mineral que ha sido sometido únicamente a procesos mecánicos.

**Árido artificial:** Árido de origen mineral resultante de un proceso industrial que ha sido tratado mediante alguna modificación físico-química o de otro tipo.

**Árido reciclado:** Producto reciclado producido en los centros de valorización y que cumple con los requisitos técnicos para una aplicación determinada.

**Árido siderúrgico:** árido artificial obtenido tras el tratamiento de las escorias generadas en la producción de acero en hornos de arco eléctrico, que garantice la estabilidad volumétrica, calidad y tamaños adecuados, de manera que cumple con las especificaciones técnicas establecidas en la normativa correspondiente para una determinada aplicación como material de la construcción.

**Balasto:** Árido que presenta totalmente machacada el 100% de la superficie de las partículas, empleado para la construcción de vías de ferrocarril y compuesto, habitualmente, por partículas de entre 31,50 mm y 63 mm. Aplicación no ligada.

**Base de carretera:** Capa del firme situada bajo el pavimento (constituido por la capa de rodadura y la capa intermedia).

---

<sup>4</sup> UNE-EN 10020:2001. Definición y clasificación de los tipos de acero.



**Capa base:** Capa del firme situada debajo del pavimento cuya misión es eminentemente estructural.

**Capa Subbase:** Cimiento del firme, que complementa la función resistente de las capas superiores y al que se asignan otras funciones complementarias. Puede constar de una o dos capas, e incluso no existir.

**Cribado:** Separación por tamaños.

**Eluato:** Solución obtenida por medio de una prueba de lixiviación en laboratorio.

**Escollera:** Conjunto de bloques de cemento que se depositan en el fondo del mar para proteger un dique o espigón de la acción del oleaje o como fundamento para la construcción de un muelle.

**Escoria:** Sustancia vítrea que sobrenada en el crisol de los hornos de fundir metales, y procede de la parte menos pura de estos, unida con las gangas y fundentes.

**Escoria negra (EAF-C):** Tipo de escoria siderúrgica o férrica de la metalurgia primera o fusión que se obtiene en la producción de acero al carbono.

**Escoria blanca (LFS):** Tipo de escoria siderúrgica o férrica de la metalurgia secundaria o afino que se obtiene en la producción de acero al carbono.

**Escoria de silicomanganeso:** Tipo de escoria de ferroaleaciones que se obtiene durante la fusión de minerales de manganeso y otras materias primas y fundentes en la producción de aleaciones de silicomanganeso.

**Escoria de cobre:** Tipo de escoria no férrica que se obtiene durante la fusión de concentrados de cobre en la producción de cobre.

**Expansión:** Aumento inestable de volumen causado por el CaO y MgO libres y otros minerales presentes en determinadas escorias.

**Explanada:** Conjunto de capas de suelos o materiales de aportación, o la estabilización de los existentes, que se encuentran bajo el firme y sobre la que se cimienta éste.

**Firme:** Conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados, y, generalmente, tratados, que constituye la superestructura de la plataforma y resiste las cargas del tráfico. Consta de pavimento, base y subbase, pudiendo existir una o las dos últimas capas.**Fundición:** Proceso pirometalúrgico que implica calentar y reducir la mena mineral para obtener un metal puro, y separarlo de la ganga y otros posibles elementos. Las escorias analizadas en este estudio -acero al carbono, cobre y silicomanganeso- son escorias de fundición.

**Gravacemento:** Mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y eventualmente adiciones que convenientemente compactada, se utiliza en la construcción de firmes de carreteras como capa de base. Aplicación ligada.

**Hormigón:** Material formado a partir de la mezcla de grava, gravilla, arena, cemento, aditivos y agua que fragua mediante reacciones de hidratación hidráulica del cemento. Aplicación ligada.

**Lixiviación:** Proceso fisicoquímico por el cual las sustancias solubles de un determinado material se transfieren a una fase líquida (habitualmente agua) en contacto con dicho material.

**Material conformado:** Terminología utilizada en ciertos países europeos para aquel material de construcción consistente en fragmentos grandes (volumen superior a 50 cm<sup>3</sup>) con prácticamente ningún riesgo de erosión o desgaste en condiciones normales (ladrillos, asfalto, etc.). En nuestro país puede asemejarse al término monolítico.

**Material no conformado:** Terminología utilizada en ciertos países europeos para aquel material de construcción consistente en fragmentos pequeños (volumen inferior a 50 cm<sup>3</sup>) o no estable en condiciones normales (cenizas, materiales granulares). En nuestro país puede asemejarse al término granular.

**Metalurgia:** Ciencia que tiene por objeto la obtención económica de los metales a partir de las menas en que están contenidos (metalurgia primaria) o a partir de residuos, desechos o chatarras (metalurgia secundaria). Los procesos metalúrgicos pueden dividirse a su vez en pirometalúrgicos, si utilizan calor para la obtención de los metales; hidrometalúrgicos, si utilizan soluciones químicas; o electrometalúrgicos, si utilizan la electricidad para separar los metales. Las escorias analizadas en este estudio -acero al carbono, cobre y silicomanganeso- son escorias pirometalúrgicas.

**Mezcla bituminosa:** Combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido polvo mineral) y eventualmente aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Aplicación ligada.

**Mortero:** Mezclas plásticas obtenidas con un aglomerante, arena y agua. Se denominan según sea el aglomerante. Así se tienen morteros de yeso, de cal o de cemento. Aplicación ligada.

**Nivel genérico de referencia (NGR):** Concentración de una sustancia contaminante en el suelo que no conlleva un riesgo superior al máximo aceptable para la salud humana o los ecosistemas, calculada de acuerdo con los criterios recogidos en el anexo VII del Real Decreto 9/2005, 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.

**Relleno localizado:** Unidad consistente en la extensión y compactación de suelos en relleno de zanjas, trasdós de obras de fábrica, cimentación o apoyo de estribos o cualquier otra zona, que, por su reducida extensión, compromiso estructural u otra causa, no permita la utilización de los mismos equipos de maquinaria con que se lleva a cabo la ejecución del resto del relleno. Aplicación no ligada.  
**Siderurgia:** Técnica de tratamiento del mineral de hierro para obtener diferentes tipos de éste o de sus aleaciones tales como el acero. Las escorias de acero al carbono -negras y blancas- son escorias siderúrgicas.

**Terraplén:** Unidad consistente en la extensión y compactación de suelos con la utilización de maquinaria pesada para crear una plataforma sobre la que se asiente el firme de una carretera. Aplicación no ligada.

**Zahorra:** Material granular, de granulometría continua, utilizado como capa de firmes de carreteras. Aplicación no ligada.

### 3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Las escorias son el conjunto de residuos formados durante las diferentes fases del proceso pirometalúrgico<sup>5</sup> y su formación comienza con la primera etapa de reducción y purificación de los metales a partir de minerales naturales y/o reciclados metálicos o chatarras.

En la naturaleza, los minerales como el hierro, el cobre, el aluminio y otros metales se encuentran en estado impuro, a menudo oxidados y mezclados con silicatos de otros metales. Durante la fundición, cuando la mena está expuesta a altas temperaturas, estas impurezas se separan del metal fundido y se pueden retirar. La colección de compuestos que se retiran constituye la escoria. Las escorias se pueden considerar como una mezcla de óxidos metálicos; sin embargo, pueden contener sulfuros y átomos de metal en forma de elemento.

Aunque las escorias suelen utilizarse como un mecanismo de eliminación de impurezas en la fundición del metal, también pueden servir para otros propósitos, como ayudar en el control de la temperatura durante la fundición y minimizar la reoxidación del metal líquido final antes de pasar al molde.

Los procesos de fundición ferrosos, no ferrosos y de las ferroaleaciones producen distintas escorias. Por ejemplo, la fundición del cobre (no ferrosa) está diseñada para eliminar el hierro y la sílice que suelen darse en estos minerales, y se separa en forma de escoria basada en silicato de hierro. Por otro lado, la escoria de las acerías, en las que se produce una fundición ferrosa, se diseña para minimizar la pérdida de hierro y, por tanto, contiene principalmente calcio, magnesio y aluminio.

La fundición ferrosa fabrica y recicla el acero mediante dos rutas que son complementarias, dado que la primera parte del mineral de hierro (siderurgia integral o alto horno) y la segunda recicla los múltiples residuos de acero (siderurgia no integral o ruta eléctrica)<sup>6</sup>. Las aleaciones de acero se realizan generalmente a través del horno de arco eléctrico, incluyendo el acero inoxidable.

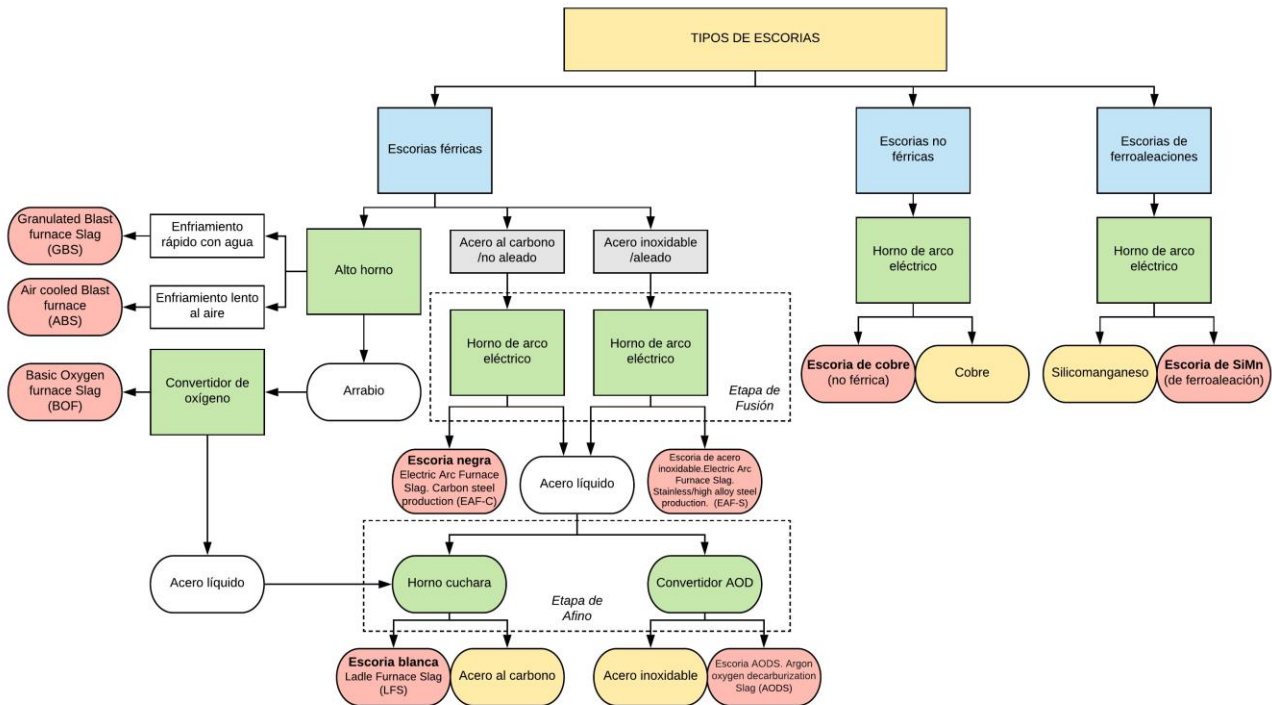
Según detalla UNESID, ambas rutas generan cuatro familias de escorias ferrosas: a) escorias de alto horno (BF) - granuladas (GBS) o vitrificadas (ABS)-, b) escorias de convertidor de oxígeno (BOF), c) escorias de horno eléctrico de acero al carbono (EAF-C) o acero inoxidable/altamente aleado (EAF-S), y d) escorias de la metalurgia secundaria del acero al carbono (LFS) o acero inoxidable/altamente aleado (AODS).

---

<sup>5</sup> Rama de la metalurgia extractiva en la que se emplean procesos para obtención o refinación de metales utilizando calor, como es el caso de la fundición.

<sup>6</sup> Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). Sistema Español de Inventario de Emisiones. Metodologías de estimación de emisiones. Hornos eléctricos de acerías. Sin fecha.

**Imagen 3-1. Diferentes tipologías de escorias procedentes de procesos de fundición ferrosos y no ferrosos. EMGRISA.**

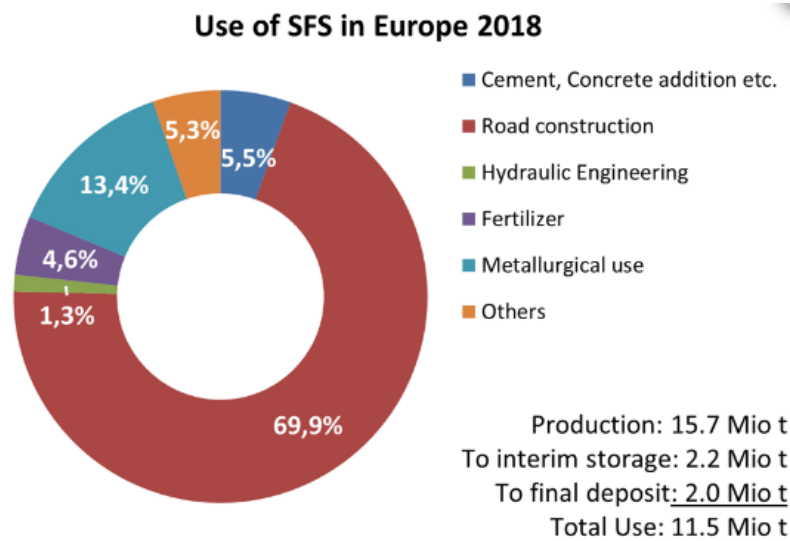


Debido a la gran generación de escorias, 400 millones de toneladas al año a nivel mundial según datos de 2015, éstas se han depositado históricamente en su mayor parte en vertederos, causando serios problemas económicos y medioambientales en todos los sectores implicados.

No obstante, según la información disponible, determinados tipos de escorias adecuadamente tratadas se pueden valorizar utilizándose en distintas aplicaciones ligadas y no ligadas tales como la construcción de carreteras, la fabricación de cemento u hormigón, fomentando así la simbiosis entre diferentes sectores económicos dentro de una misma región y optimizando los recursos.

Así mismo, el sector cuenta con una intensa actividad en I+D+I que trata de encontrar nuevas aplicaciones para las escorias y mejorar las existentes, lo cual genera cada vez más y diferentes materiales para su comercialización.

Imagen 3-2. Ejemplos de aplicaciones de las escorias de acero en Europa. EUROSILAG.



Las escorias son, por tanto, residuos que tras satisfacer una serie de requisitos podrían perder dicha condición. Como producto dejarían de estar bajo el amparo de la legislación de residuos quedando sujetos a la legislación y normativa de productos, tales como la *Directiva de los Productos de Construcción (DPC)*, sustituida por el *Reglamento (CPR)*<sup>7</sup>, el *Reglamento REACH*<sup>8</sup> o la *Directiva IPPC*<sup>9</sup>.

Bajo la interpretación de que se trata de materiales y no residuos, tras la entrada en vigor del *Reglamento REACH* en 2007, algunas empresas productoras iniciaron el procedimiento de registro de determinadas escorias, asumiendo de manera general que se trataba de subproductos o productos. Durante el proceso de registro se evaluaron y discutieron datos de composición de las escorias de los distintos procesos productivos en toda Europa, acordando que la mejor manera de definir el proceso productivo y la composición de éstas era a través de su registro como sustancias UVCB (*Unknown or Variable composition, Complex reaction products or Biological materials*) pudiendo utilizar su composición química como información adicional.

Esto significa que para estos materiales no hay una composición exacta, sino que se definen por el proceso de generación o por rangos en sus compuestos mayoritarios y por valores medios y máximos dentro de los minoritarios, variando en función de las materias primas utilizadas y el control de las condiciones de operación.

<sup>7</sup> 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 y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo.

<sup>8</sup> Reglamento (CE) 1907/2006 relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).

<sup>9</sup> Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación).

Existe cierta controversia en relación con las escorias que ha provocado que la situación legal en cuanto a la clasificación no sea uniforme en los diferentes Estados Miembros, pudiendo ser reconocidas como subproductos o productos en ciertos países bajo el amparo del mercado CE o continuar bajo el estatus de residuo en otros.

Este debate ha quedado reflejado en el documento *Study to Assess Member States (MS) Practices on By-Product (BP) and End-of-Waste (EoW)*, de abril de 2020 de la Comisión Europea, en el que se concluye que algunos pocos tipos de escorias, como las escorias de alto horno o algunas escorias tratadas podrían ser consideradas como subproductos, pudiendo obtener el resto, tras haber sido sometidas a un tratamiento, el fin de condición de residuo.

Independientemente del enfoque adoptado, se señala la necesidad de tener en cuenta los posibles impactos al medio ambiente y a la salud de las personas derivados del contenido de sustancias peligrosas en las escorias, especialmente los metales pesados. Cabe señalar que, incluso en aquellos países en los que se reconoce a las escorias como subproducto, suelen estar sujetas a una serie de condicionantes que permiten su valorización en condiciones seguras para la salud humana y el medio ambiente. Es por ello por lo que, como recomendación final, dicho estudio propone establecer estándares comunes a nivel europeo para cada tipo de escoria, bajo la figura de FcR.

Por todo lo citado anteriormente, el presente estudio analiza las posibilidades y condiciones de utilización de las escorias -acero al carbono, cobre y silicomanganeso- teniendo presente los posibles impactos para la salud humana y el medio ambiente derivados de su uso.

## 4. MARCO NORMATIVO O REGULADOR DEL USO DE LAS ESCORIAS

### 4.1 EN ESPAÑA

En España se han identificado tres comunidades autónomas (CCAA) donde se regula la valorización de determinadas escorias cuyos decretos se analizan en profundidad posteriormente. El tipo de escoria concreto, así como las aplicaciones genéricas reguladas por cada Comunidad Autónoma se indican en la tabla siguiente:

**Tabla 4.1-1. CCAA que regulan el uso de las escorias.**

| Comunidad Autónoma | Tipo de escoria  | Aplicaciones         | Otras aplicaciones                                |
|--------------------|--|----------------------|---|
| País Vasco         | Escoria negra  | Ligadas y no ligadas | Sí, bajo autorización previa del órgano ambiental |
| Cantabria          | Escoria negra<br>Escoria blanca<br>Escoria de silicomanganeso<br>Escoria de incineración de residuos<br>Escoria de fundición | Ligadas y no ligadas | Sí, bajo autorización previa del órgano ambiental |
| Cataluña           | Escoria negra  | Ligadas y no ligadas | Sí, bajo autorización previa del órgano ambiental |

#### 4.1.1 País vasco

En el País Vasco, la valorización y utilización de las escorias se regula mediante el *Decreto 64/2019, de 9 de abril, del régimen jurídico aplicable a las actividades de valorización de escorias negras procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico*.

Dicho decreto establece el régimen jurídico aplicable a las **operaciones de valorización de escorias negras** procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico y su posterior utilización como árido siderúrgico, garantizando la protección del medio ambiente y de la salud pública.

Tal y como indicó el País Vasco en la Reunión del Grupo de Trabajo de Subproductos y Fin de Condición de Residuo, celebrado el día 27 de noviembre de 2019, el nuevo decreto no regula las escorias blancas como el anterior<sup>10</sup>, ya que éstas únicamente se utilizan en las plantas cementeras y dicho uso se viene realizando sin problemática alguna.

El marco programático en el que se ubica el decreto es el *Plan de Prevención y Gestión de Residuos de la Comunidad Autónoma del País Vasco/2020 «Hacia una economía circular»<sup>11</sup>*. Las escorias de acería, con una

<sup>10</sup> Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

<sup>11</sup> Plan de Prevención y Gestión de Residuos de la Comunidad Autónoma del País Vasco/2020 «Hacia una economía circular». 2015.

generación de 910.367 t/año, constituyen el mayor flujo de residuos no peligrosos de este plan y presentan una tasa de reciclaje del 51%.

Por otra parte, la *Guía de Aplicación del Decreto de Actividades de Valorización de Escorias Negras de Fabricación de Acero en Hornos de Arco Eléctrico y su Utilización como Árido Siderúrgico*<sup>12</sup>, elaborada por la Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco (IHOBE -Ingurumen hobekuntza-) de abril de 2019, señala que el proceso de valorización de la escoria negra de horno eléctrico de arco (HEA) para obtener un material granular, denominado como árido siderúrgico, contempla una serie de tratamientos previos dirigidos a eliminar elementos metálicos, obtener husos granulométricos comerciales, así como garantizar la estabilidad volumétrica del material granular resultante.

En base a esto, el Gobierno Vasco considera que la escoria no se puede emplear de manera directa sino después de una serie de tratamientos. Concretamente, el decreto establece que, en el proceso de transformación, se deberán controlar las siguientes etapas:

1. Almacenamiento de la escoria negra.
  - Incluye la estabilización de compuestos potencialmente expansivos contenidos en la escoria negra de origen o áridos siderúrgicos subsiguientes, por medio de procesos de maduración o envejecimiento, bien de la escoria negra previa a su tratamiento, bien del árido siderúrgico resultante del proceso de tratamiento. Los procesos de maduración y envejecimiento podrán consistir en regado con agua, volteo del material acopiado, acopio en presencia de CO<sub>2</sub> atmosférico u otros procesos de carbonatación acelerada dirigidos a transformar los compuestos expansivos en carbonatos.
  - Los periodos de maduración y envejecimiento podrán oscilar entre 3 y 120 días, en función del tipo de escoria, el proceso de enfriamiento, el objetivo de expansión deseable para una determinada aplicación y el procedimiento de envejecimiento adoptado.

En cualquier caso, es necesario garantizar el valor de la expansividad, determinado de acuerdo con el apartado 19.3 de la UNE EN 1744<sup>13</sup> y en función de los requerimientos de cada uso.
2. Machaqueo.
3. Desferretización.
4. Cribado.
5. Acopio diferenciado por fracciones de material granular siderúrgico.
6. Caracterización del árido siderúrgico.

Con ello, se pretende un uso seguro de la escoria que minimice el riesgo de impacto al suelo.

---

<sup>12</sup> *Guía de Aplicación del Decreto de Actividades de Valorización de Escorias Negras de Fabricación de Acero en Hornos de Arco Eléctrico y su Utilización como Árido Siderúrgico*. 2019.

<sup>13</sup> UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013. *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*.



En base al análisis de riesgo de escenarios seguros, se plantean tres tipos de uso<sup>14</sup>:

**Tipo 1. Aplicaciones ligadas.** Uso de los materiales granulares mezclados con cualquier tipo de conglomerante que confiere cohesión al conjunto encapsulando los áridos dentro de una matriz inorgánica, donde su exposición al medio y la liberación de componentes se consideran nulas o despreciables.

- Hormigón estructural (estructural, preparado, prefabricados, cajones para diques).
- Hormigón no estructural (de limpieza, de relleno).
- Hormigón para carreteras (pavimentos de hormigón, magro vibrado).
- Material tratado con cemento (gravacemento).
- Mezclas bituminosas en caliente (hormigón bituminoso, mezcla bituminosa de capa de rodadura, drenante, mezclas discontinuas).
- Mezclas bituminosas en frío.
- Tratamientos superficiales con gravilla.
- Morteros

**Tipo 2. Aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable.** Uso de materiales granulares compactados en capas para la ejecución de diversas unidades de obra civil, sin que se adicione conglomerante alguno, bajo coberturas de materiales no totalmente impermeables.

1. Zonas en talud de terraplenes.
2. Rellenos localizados o asimilables a terraplén bajo cobertura no totalmente impermeable (rellenos, nivelación de terrenos, cubrición de vertederos<sup>15</sup>).
3. Sub-balasto de vías férreas.
4. Apantallamientos sónicos para estructuras viarias.

**Tipo 3. Aplicaciones no ligadas bajo cobertura totalmente impermeable.** Uso de materiales granulares compactados en capas para la ejecución de diversas unidades de obra civil, sin que se adicione conglomerante alguno. Este tipo exigirá el uso de coberturas que garanticen una impermeabilización.

---

<sup>14</sup> En la Guía de aplicación del decreto se definen con detalle cada una de las aplicaciones definidas en los tres escenarios.

<sup>15</sup> Según la Guía de aplicación del decreto: *La utilización de rellenos con áridos siderúrgicos se limitan a usos de poco valor añadido en el caso de cubriciones para vertederos y pistas provisionales para el paso de vehículos en su interior. En el primer caso, los rellenos con árido siderúrgico podrán ir situados en la capa de regularización, directamente sobre el vertido de residuos y bajo las diferentes capas que garantizan la impermeabilización parcial o total del vertedero. Las pistas provisionales en el interior del vertedero podrán ejecutarse con rellenos conteniendo áridos siderúrgicos en cualquiera de sus capas puesto que las zonas de vertido han sido preparadas con anterioridad para garantizar la impermeabilización del vaso de vertido, el drenaje y la recogida de los lixiviados para su control y posterior tratamiento.*

1. Zahorras artificiales.
2. Bases, subbases de vías peatonales, ciclistas y pistas deportivas.
3. Explanadas mejoradas.
4. Terraplenes, excepto zonas expuestas de talud (incluso cuando tengan coberturas de tierra natural)
5. Zonas en talud (espaldones) de terraplenes.
6. Rellenos localizados bajo cobertura de alta impermeabilización (zanjas, cubrición tuberías, encachados, trasdós)
7. Proyectos de urbanización.

Además de en estos tres escenarios, los áridos siderúrgicos podrán emplearse en la cubrición de vertederos y en la construcción de pistas provisionales en su interior, así como materia prima en la fabricación de cemento.

### **Usos prohibidos**

La utilización de los áridos siderúrgicos procedentes de la valorización de escorias negras en alguno de los usos no ligados contemplados anteriormente, con carácter general, estará sometida a las siguientes restricciones:

- No se utilizarán en espacios o lugares que presenten alguna figura de protección especial contemplada en la normativa sobre la conservación de la naturaleza.
- No se utilizarán áridos siderúrgicos en contacto directo con el suelo en aquellas zonas cuyo uso sea asimilable al establecido como “*Otros usos*” de acuerdo con el Anexo I a la *Ley 4/2015, del 25 de junio, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo.*
- No se utilizarán en aquellos usos en los que se encuentren en contacto con el agua.
- No se utilizarán como material granular en aplicaciones drenantes o en lugares por donde discurra agua de manera temporal.
- No se utilizarán en usos en los que se emplacen en aplicaciones sin cobertura alguna, tales como pistas forestales, caminos rurales no asfaltados u hormigonados o balastos ferroviarios.

Los áridos siderúrgicos no podrán utilizarse en usos y destinos distintos a los contemplados en el decreto, salvo que medie autorización expresa del órgano ambiental de la Comunidad Autónoma del País Vasco, que será otorgada con carácter excepcional y previa la oportuna justificación por parte de la entidad interesada de la idoneidad del uso propuesto.

### **Condiciones de aplicación**

Se establecen los criterios ambientales requeridos a las entidades valorizadoras de áridos siderúrgicos, así como los requisitos que deben cumplir los elementos de impermeabilización en cada uno de los dos tipos de

aplicaciones no ligadas definidas. Los áridos siderúrgicos empleados en aplicaciones ligadas (tipo 1) no precisarán de medidas de control ambiental toda vez que queda acreditada la ausencia de afección al medio.

**Tabla 4.1.1-1. Tipos de aplicación, condiciones de usos y elementos de impermeabilización.  
 Decreto 64/2019, de 9 de abril. País Vasco.**

| Uso   | Condiciones de uso  | Elementos de impermeabilización  |
|---|---|--|
| Tipo 2<br>Aplicaciones no ligadas con cobertura no totalmente impermeable | Usos donde se emplee el árido como material granular y cumpla criterios ambientales. Coberturas no totalmente impermeables.             | Cobertura de material granular compactado (densidad superior a 97% PM <sup>16</sup> ) con granulometría continua en espesor no inferior a 25 centímetros. Superficie con inclinación igual o superior a 3H:1V vegetada. Cualquier otro elemento con análogas propiedades.  |
| Tipo 3<br>Aplicaciones no ligadas con cobertura totalmente impermeable    | Usos donde se emplee el árido como material granular y cumpla criterios ambientales. Cobertura con un alto nivel de impermeabilización. | Solera o pavimento de hormigón de espesor mínimo de 20 centímetros.<br>Gravacemiento de espesor mínimo de 20 centímetros.<br>Capas asfálticas tipo hormigón bituminoso de espesor igual o superior a 5 centímetros.<br>Lámina de impermeabilización (por ejemplo, de PE de alta densidad) protegida por geotextiles.<br>Cualquier otro elemento con análogas propiedades |

En el decreto actualmente vigente no se recoge de manera explícita un espesor máximo de aplicación de escorias, si bien este requisito sí se recoge en la Guía de aplicación de dicho decreto, considerando un espesor máximo de 0,7 m, valor contemplado en el Decreto 34/2003, de 18 de febrero<sup>17</sup> derogado, y en el que se han basado el resto de CCAA.

Este espesor es el que se consideró en la metodología empleada por el País Vasco para estimar la liberación de contaminantes de las escorias y, por tanto, en el cálculo de los valores límite de lixiviación de metales pesados establecidos en el decreto que se encuentra derogado. Para este cálculo, se consideró un escenario con una altura de aplicación de las escorias de 0,7 m, espesor que engloba las diferentes alturas de material granular utilizadas en una carretera, y la utilización de capas granulares constituidas exclusivamente por escorias<sup>18</sup>.

<sup>16</sup> PM: *Peso molecular.*

<sup>17</sup> Decreto 34/2003 de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico. Art. 7.1 *“Cuando las escorias valorizadas se utilicen en capas estructurales de carreteras y vías privadas de tráfico rodado consistentes en explanada mejorada, sub-base y base, aquéllas deberán contar con capa de rodadura y el espesor de la capa de escorias no superará los 70 cm. Cuando la construcción de dichas capas estructurales se lleve a cabo mediante la utilización de mezclas de escorias y otros materiales tradicionales, el espesor arriba citado podrá corregirse al alza en función del porcentaje de escorias en la mezcla utilizada.*

<sup>18</sup> IHOBE. Libro Blanco para la Minimización de Residuos y Emisiones. Escorias de acería. 1999.

### Condiciones que deben cumplir las escorias

En aquellas aplicaciones en las que el árido siderúrgico se emplee en contacto directo con el suelo de acuerdo con los escenarios 2 y 3, dicho árido deberá presentar unas concentraciones totales inferiores, de forma genérica, a los siguientes valores límite.

La mayor parte de estos valores coinciden con los valores VIE-B<sup>19</sup> para la protección de la salud humana para la categoría “otros usos” (uso residencial viviendas unifamiliares y actividades agropecuarias), establecidos en la *Ley 4/2015, de 25 de junio, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo*, a excepción del cromo<sup>20</sup>, para el que el decreto de escorias establece un valor límite de concentración 50 veces mayor que el VIE-B otros usos (10.000 mg/kg frente a 200 mg/kg) y el vanadio, para el que no se establece VIE-B).

**Tabla 4.1.1-2. Valores límite de contenido total en árido siderúrgico para aplicaciones no ligadas.  
Decreto 64/2019, de 9 de abril. País Vasco.**

| Parámetro        | Valor (mg/kg) |
|------------------|---------------|
| Arsénico (As)    | 30            |
| Cadmio (Cd)      | 5             |
| Cobre (Cu)       | 10.000        |
| Cromo (VI)       | 8             |
| Cromo Total (Cr) | 10.000        |
| Mercurio (Hg)    | 4             |
| Molibdeno (Mo)   | 75            |
| Níquel (Ni)      | 110           |
| Plomo (Pb)       | 120           |
| Zinc (Zn)        | 10.000        |
| Vanadio (V)      | 1.000         |

La norma indica que los áridos siderúrgicos a utilizar en los tipos 2 y 3 que cumplan con las condiciones de lixiviación, pero no cumplan con las condiciones de contenido total **no podrán estar en contacto directo con el suelo**. En este caso, únicamente podrán utilizarse estos áridos siderúrgicos en los usos descritos para los tipos 2 y 3 siempre y cuando se disponga de una capa de material constructivo que impida su contacto directo con el suelo natural.

<sup>19</sup> Valor indicativo de evaluación B: estándar que indica la concentración de una sustancia en el suelo por encima de la cual el suelo está alterado y existe la posibilidad de que esté contaminado, extremo para cuya confirmación se requerirá la realización de un análisis de riesgos. El VIE-B se define para los distintos usos del suelo.

<sup>20</sup> En el caso del cromo total (en realidad es cromo III porque el VI se está limitando mucho), la concentración permitida es mucho mayor que la establecida en los VIE-B. Se desconoce exactamente el motivo, pudiendo ser debido a la toxicidad del cromo III y/o a su comportamiento en el medioambiente. (El Cr (VI) es altamente móvil, biodisponible y más tóxico para la flora y la fauna, mientras que el Cr (III) es menos tóxico, más inmóvil y precipita fácilmente en suelos con pH > 6).

Se deberá llevar a cabo un control de la lixiviación de los áridos siderúrgicos según norma UNE-EN-12457-4<sup>21</sup> acreditándose la no superación de los valores límite de lixiviación siguientes:

**Tabla 4.1.1-3. Valores límite de lixiviación en árido siderúrgico para aplicaciones no ligadas. Decreto 64/2019, de 9 de abril. País Vasco.**

| Parámetro        | Tipo 2 (mg/kg) | Tipo 3 (mg/kg) |
|------------------|----------------|----------------|
| Arsénico (As)    | 0,5            | 0,6            |
| Bario (Ba)       | 20             | 25             |
| Cadmio (Cd)      | 0,04           | 0,05           |
| Cromo total (Cr) | 0,5            | 2              |
| Cromo (VI)       | 0,1            | 0,4            |
| Cobre (Cu)       | 2              | 3              |
| Mercurio (Hg)    | 0,01           | 0,01           |
| Molibdeno (Mo)   | 0,5            | 2,8            |
| Níquel (Ni)      | 0,4            | 0,5            |
| Plomo (pb)       | 0,5            | 0,6            |
| Antimonio (Sb)   | 0,06           | 0,08           |
| Selenio (Se)     | 0,1            | 0,4            |
| Zinc (Zn)        | 4              | 5              |
| Cloro (Cl)       | 800            | 5.000          |
| Flúor (F)        | 18             | 30             |
| Sulfato          | 1.000          | 5.000          |
| Vanadio (V)      | 1,5            | 4              |

El seguimiento del cumplimiento de estos parámetros se realizará a través de análisis periódicos cuya frecuencia se muestra a continuación:

**Tabla 4.1.1-4. Frecuencia de muestreo y control de la producción.**

| Producción anual | N.º muestras | Frecuencia |
|------------------|--------------|------------|
| <30.000 tm/año   | 1            | 3 meses *  |
| >30.000 tm/año   | 1            | 1 mes **   |

\* Si se obtienen resultados conformes a lo dispuesto durante doce muestras consecutivas, la frecuencia de muestreo se reducirá a una muestra al semestre siempre y cuando se mantengan dichos resultados positivos. En caso contrario, se retornará a la frecuencia original.

\*\* Si se obtienen resultados conformes a lo dispuesto durante doce muestras consecutivas, la frecuencia de muestro se reducirá a una muestra al trimestre siempre y cuando se mantengan dichos resultados en positivo. En caso contrario, se retornará a la frecuencia original.

<sup>21</sup> UNE-EN 12457-4:2003. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 L/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño).

### **Expansividad**

Se deberá llevar a cabo un control de la expansividad, determinada de acuerdo con el apartado 19.3 de la UNE-EN 1744<sup>22</sup>, acreditativo de que no se ha producido la mezcla de escorias negras con escorias blancas.

### **Requisitos de trazabilidad**

Sin perjuicio del resto de obligaciones recogidas en la legislación sobre residuos y suelos contaminados o, en su caso, de prevención y control integrados de la contaminación, las personas titulares de las actividades de valorización de escorias deberán cumplir las siguientes obligaciones:

- Llevar a cabo el tratamiento de los residuos entregados conforme a lo previsto en su autorización.
- Dar cumplimiento a las obligaciones derivadas del régimen de traslados de residuos conforme lo dispuesto en la *Ley 22/2011, de julio, de residuos y suelos contaminados* y el *Real Decreto 180/2015, de 13 de marzo, por el que se regula el traslado de residuos en el territorio del Estado*, o normativa que los sustituyan.
- Informar a las personas usuarias sobre las características ambientales del árido siderúrgico, los usos a los que pueden ser destinados en función de estas y las restricciones requeridas para dichos usos.
- Disponer de la documentación acreditativa del correspondiente marcado CE del árido siderúrgico y dar entrega de esta a la entidad usuaria final.
- Disponer de un archivo actualizado a disposición del órgano ambiental de la Comunidad Autónoma del País Vasco, donde se recojan por orden cronológico: la cantidad y procedencia de las escorias a valorizar, las cantidades de áridos siderúrgicos resultantes por tipo de uso posible y entidades usuarias finales.
- Realizar los análisis y muestreos previstos.

Los áridos siderúrgicos dispondrán del marcado CE en aquellos usos para los que resulte exigible por la legislación europea de aplicación.

#### **4.1.2 Cantabria**

El *Decreto 100/2018, de 20 de diciembre, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria*, tiene por objeto establecer el régimen jurídico aplicable a la gestión de escorias para fomentar su valorización, asegurando, asimismo, una adecuada protección del medio ambiente y la salud de las personas y, en particular, sin crear riesgos para el agua, el aire o el suelo, ni para la fauna o flora, sin provocar incomodidades por el ruido o los olores y sin atentar contra los paisajes y lugares de especial interés.

---

<sup>22</sup> UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013. *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.*

Se aplica a las escorias procedentes de los procesos térmicos empleados en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Cantabria, como son:

- **Escoria negra de acería:** capa sobrenadante que se produce durante la operación de fusión de materias primas en la fabricación del acero y que se separa de la carga líquida por diferencia de densidades.
- **Escoria de ferroaleaciones de ferrosilicomanganeso:** material de origen industrial de naturaleza inorgánica que se genera en la fabricación de ferroaleaciones de ferrosilicomanganeso de las que se separa por diferencia de densidad.
- **Escoria blanca de acería:** capa sobrenadante que se produce durante la operación de afinado del acero fundido y que se separa de la carga líquida por diferencia de densidades.
- Escoria de incineración de residuos domésticos: fracción granular del material no combustible obtenido en el fondo del horno resultante de la valorización energética del combustible derivado de residuos no peligrosos de origen doméstico.
- Escoria de fundición: material obtenido por diferencia de densidades con respecto al caldo generado en los distintos tipos de hornos empleados en el proceso de fusión de metales féreos.

El decreto distingue entre escorias valorizables, aquellas que cumplen con las características especificadas en el Anexo I (Tabla 4.1.2-1 del presente estudio), y escorias no valorizables, aquellas que no cumplen con alguna de las características especificadas en dicho Anexo I. Para esta clasificación, las determinaciones analíticas se harán sobre una muestra semanal en el plazo de un mes, que serán remitidas a la Dirección General de Medio Ambiente del gobierno autonómico.

Así mismo, especifica que tendrán la consideración de operaciones de valorización de escorias los procesos de separación de metales, maduración, trituración, molienda, clasificación o separación granulométrica, incluyendo también la comprobación del cumplimiento de las condiciones establecidas en el decreto para considerar las escorias como valorizables.

Las escorias valorizadas, conforme a lo dispuesto en el citado decreto, se consideran materias aptas ambientalmente para los usos siguientes:

a) **Escoria de ferroaleaciones de ferrosilicomanganeso:**

- En construcción de carreteras y vías públicas o privadas de tráfico.
- En obras de urbanización de áreas industriales y comerciales.
- En la fabricación de clínker.
- En la fabricación de hormigón.
- Como relleno del interior de cajones de hormigón cerrados, para la construcción de diques en obras portuarias.
- En restauración de áreas degradadas por actividades extractivas.

**b) Escoria negra de acería:**

- En construcción de carreteras y vías públicas o privadas de tráfico.
- En obras de urbanización de áreas industriales y comerciales.
- En la fabricación de clínker.
- En la fabricación de hormigón.
- En la fabricación de aglomerado asfáltico.
- En la fabricación de ferroaleaciones.
- Como relleno del interior de cajones de hormigón cerrados, para la construcción de diques en obras portuarias.

**c) Escoria blanca de acería:**

- En la fabricación de clínker.

**d) Escoria de incineración de residuos domésticos:**

- En construcción de carreteras y vías públicas o privadas de tráfico.
- En la fabricación de hormigón.

**e) Escoria de fundición:**

- En construcción de carreteras y vías públicas o privadas de tráfico.
- En la fabricación de clínker.
- En la fabricación de hormigón.
- En la fabricación de aglomerado asfáltico.
- Como relleno del interior de cajones de hormigón cerrados, para la construcción de diques en obras portuarias.
- En restauración de áreas degradadas por actividades extractivas.

Además, en todos los casos, las escorias valorizadas podrán ser utilizadas como material constructivo en vertederos, en caminos interiores al vaso de deposición, formación de taludes y, en general, en cualquier aplicación necesaria para la explotación de vertederos autorizados conforme al *Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*, siempre que dichas escorias se encuentren dentro de la zona de impermeabilización del vaso de vertido.

Podrán ser autorizados otros usos por la Dirección General de Medio Ambiente, que se encontrarán igualmente sometidos a la regulación del decreto. Para ello, se deberá presentar ante el órgano ambiental de la Comunidad Autónoma de Cantabria una solicitud en la que se acredite que la actuación propuesta es ambientalmente correcta, no afecta a la salud de las personas y no afecta a la calidad de las aguas ni los bienes que integran el Dominio Público Hidráulico, el suelo y los recursos naturales.



### **Obligaciones para los operadores**

#### *Documento aceptación de escorias*

1. Todo productor de escorias con destino a una instalación de valorización deberá solicitar un compromiso documental de aceptación por parte del valorizador, debiendo acompañar los documentos correspondientes a los análisis que acrediten la condición de valorizable de la escoria.
2. El valorizador, en el plazo máximo de un mes, deberá manifestar documentalmente la aceptación y los términos de esta o, en su caso, la no aceptación de esta, comprometiéndose, en el primero de los supuestos, a valorizar las escorias de acuerdo con lo dispuesto en el presente decreto. Dicho compromiso documental de aceptación será requisito imprescindible y de carácter previo al traslado de las escorias valorizables desde las instalaciones del productor.
3. El valorizador remitirá a la Dirección General de Medio Ambiente una copia del documento de aceptación junto con un original o copia compulsada de la documentación descrita en el apartado 1, debiendo conservar tanto él como el productor de escorias, un ejemplar del citado documento durante el período de validez de este.

#### *Documento entrega de escorias*

1. Cada entrega de escorias de un productor a un valorizador de escorias se formalizará en un Documento de entrega de escorias, transmitiéndose la responsabilidad del productor al valorizador.
2. Dicho documento se ajustará al modelo establecido en el Anexo VI.
3. Tanto el productor como el valorizador conservarán los documentos de entrega de escorias por un período no inferior a cinco años.

### **Condiciones que deben cumplir las escorias**

Se entiende que una escoria es valorizable cuando los resultados de los análisis realizados sobre los parámetros que se indican a continuación no sobrepasan los valores máximos indicados siguientes:

**Tabla 4.1.2-1. Valores límite sobre el lixiviado según UNE-EN 12457-4.  
Decreto 100/2018, de 20 de diciembre. Cantabria.**

| Parámetro   | Valor (mg/kg) |
|-------------|---------------|
| Bario       | 20            |
| Arsénico    | 0,5           |
| Cadmio      | 0,04          |
| Cobre       | 2             |
| Cromo total | 0,5           |
| Mercurio    | 0,01          |
| Níquel      | 0,4           |
| Plomo       | 0,5           |

| Parámetro       | Valor (mg/kg) |
|-----------------|---------------|
| Zinc            | 4             |
| Molibdeno       | 0,5           |
| Selenio         | 0,1           |
| Antimonio       | 0,06          |
| Cloruro         | 800           |
| Fluoruro        | 10            |
| Sulfato         | 1000          |
| Índice de fenol | 1             |
| COD             | 500           |
| STD             | 4000          |

*Los valores de sólidos totales disueltos (STD) podrán utilizarse como alternativa a los valores de sulfato y cloruro.*

Estos parámetros podrán no ser de aplicación cuando los usos previstos de la escoria valorizada sean como materia prima objeto de una transformación posterior en la fabricación de hormigón o cemento.

La frecuencia de los muestreos será trimestral el primer año, momento a partir del cual será la Dirección General de Medio Ambiente quien determine esta frecuencia, siendo como mínimo necesario un ensayo al año.

### Condiciones de aplicación

La utilización de escorias valorizadas en alguno de los usos contemplados en el decreto estará sometida a las siguientes condiciones:

**Tabla 4.1.2-2. Tipos de aplicación y condiciones de usos. Decreto 100/2018, de 20 de diciembre. Cantabria.**

| Uso  | Condiciones de uso   |
|--|--|
| En carreteras y vías públicas o privadas de tráfico rodado | - Deberán <b>contar con capa de rodadura impermeable</b> y el espesor de la capa de escorias no superará los valores establecidos en el Anexo III y especificados a continuación:  |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Escoria de ferroaleaciones de ferrosilicomanganeso 40m</li> <li>Escoria negra de acería 0,7m</li> <li>Escoria de incineración de residuos 0,7m</li> <li>Escoria de fundición 7m</li> </ul>  |
|  | - Cuando la construcción de dichas capas estructurales del firme se lleve a cabo mediante la utilización de mezclas de escorias y otros materiales tradicionales, el espesor arriba citado podrá corregirse al alza en función del porcentaje de escorias en la mezcla utilizada. En estos casos podrá aumentarse el espesor de la capa de |

| Uso   | Condiciones de uso  |
|---|---|
|   | <p>escorias de manera que la cantidad total de escoria utilizada no supere la permitida en caso de que se hubiese utilizado exclusivamente.</p>   |
| <p>Como áridos para capas granulares y/o mezclas bituminosas en la construcción de carreteras</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deberá contarse con el marcado CE del producto, que debe ir acompañado de la declaración de prestaciones y de las instrucciones e información de seguridad del producto.</li> </ul>  |
| <p>En las carreteras pertenecientes a la Red autonómica de Cantabria</p>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo la supervisión del órgano competente en la materia, se contemplarán, además de los anteriores, los requisitos establecidos en el Anexo IV del decreto, relativos a garantizar la trazabilidad de las escorias (datos del productor, del usuario de las escorias valorizadas, descripción de la ubicación, cantidad y características de las escorias valorizadas, procedimiento de valorización empleado, espesor de escorias y mezcla porcentual con otros materiales tradicionales).</li> </ul> |
| <p>En obras de urbanización de áreas industriales y comerciales</p>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deberá estar sometido a todas las condiciones señaladas en el resto de los usos, debiendo incorporarse, además, una <b>capa superior impermeable</b>.</li> </ul>   |
| <p>Fabricación de hormigón estructural</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)</i> y deberá ser aprobado por el director de obra.</li> </ul>  |
| <p>En restauración de áreas degradadas por actividades extractivas</p>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deberá contar con una capa superior que garantice una infiltración menor de 6 mm/año y el espesor de la capa de escorias no superará los valores establecidos en el Anexo III (indicados anteriormente en el primero de los usos de esta tabla).</li> </ul>  |

### Usos prohibidos

Las escorias valorizadas no se utilizarán en:

- zonas inundables o en aquellas zonas comprendidas dentro de los perímetros de protección de acuíferos con vulnerabilidad muy alta o alta. En el caso de restauración de áreas degradadas por industrias extractivas, deberá contarse con un informe previo del organismo de cuenca correspondiente.
- en espacios naturales que presenten alguna figura de protección especial de las recogidas en la legislación sobre espacios naturales y conservación de la naturaleza. En concreto, en la *Ley de Cantabria 4/2006, de 19 de mayo, de conservación de la naturaleza de Cantabria* o normativa que la sustituya.

### 4.1.3 Cataluña

#### ***Introducción y ámbito de aplicación***

En esta comunidad autónoma, mediante el *Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre la valorización de escorias siderúrgicas* se regula la valorización y utilización de las escorias para su uso como árido en obra civil.

Se entiende por escoria siderúrgica **la procedente de la fabricación de acero en horno de arco eléctrico** que se forma una vez acabado el proceso térmico y que es retirada del baño metálico en el que sobrenada mediante la operación de desescoriación, una vez separada la fracción férrica, es decir, el decreto solo **considera la escoria negra**.

Así mismo, define **escoria siderúrgica valorizable** como el material inorgánico obtenido mediante operaciones de **tratamiento y adecuación** de la escoria siderúrgica, que presenta características técnicas aptas para ser utilizado como sustituto de árido natural, de acuerdo con los requisitos establecidos en el decreto.

El tratamiento de las escorias siderúrgicas, previo a su utilización, se podrá realizar en los mismos centros de producción o en plantas externas.

#### ***Obligaciones para los operadores***

##### *Para el productor*

- Incluir en la declaración anual de residuos industriales los datos relativos a la cantidad generada y la gestión llevada a cabo.
- Si opta por un tratamiento externo de las escorias siderúrgicas valorizables, previo a su utilización, las deberá entregar a un gestor autorizado e inscrito en el Registro General de Gestores de Residuos de Cataluña.

##### *Para el tratador*

- Mantener actualizado un registro de las entregas de las escorias siderúrgicas valorizables, que debe estar a disposición de la Agencia de Residuos de Cataluña.
- Presentar a la Agencia de Residuos de Cataluña una memoria que contenga los datos mencionados cada seis meses.
- En caso de destinar las escorias siderúrgicas valorizables a los usos como árido en obra civil, ha de realizar un análisis de seguimiento de las escorias siderúrgicas valorizables para verificar el cumplimiento de los valores límite establecidos.
- Garantizar que las escorias valorizables se entreguen para ser utilizadas para los usos permitidos en este decreto.

### *Para los usuarios*

- Informar al tratador sobre el uso previsto de ésta y aportar la documentación que lo acredite, que ha de incluir una descripción del uso al que se destinan las escorias siderúrgicas valorizables, los datos sobre la cantidad de escoria siderúrgica valorizable utilizada y los planos que indiquen la situación del lugar en que se emplean las escorias siderúrgicas valorizables.
- Utilizar las escorias valorizables de acuerdo con lo que establece el decreto.

### **Condiciones que deben cumplir las escorias**

Los requisitos que han de cumplir las escorias siderúrgicas para ser declaradas como valorizables para su uso en obra civil, son las siguientes:

1. Deberán cumplir los valores límite de lixiviación establecidos en el Anexo II, que se corresponden con los valores límite de aceptación en vertederos de residuos inertes para una relación L/S=10 de acuerdo con la norma EN 12457-4:2002<sup>23</sup>, excepto para los fluoruros, compuestos para los que se ha establecido un valor superior, de 18 mg/kg respecto al valor de 10 mg/kg del *Real Decreto 646/2020, de 7 de julio*<sup>24</sup>.

Las determinaciones analíticas señaladas en el Anexo II se realizarán sobre el número de muestras indicado en el Anexo III del decreto, que se corresponde con una muestra diaria en el plazo de una semana y una muestra quincenal en el plazo de tres meses. El muestreo se realizará de acuerdo con el anexo VII de la Orden de 1 de junio de 1995, sobre calificación y acreditación de laboratorios para la determinación de las características de los residuos. Las muestras se tomarán obligatoriamente una vez las escorias siderúrgicas hayan pasado por los sistemas de separación de metales.

La Agencia de Residuos de Cataluña puede considerar una escoria siderúrgica como no valorizable para su uso en obra civil si en su análisis se detectan elementos contaminantes no previstos en la lista del Anexo II, susceptibles de poner en peligro la salud humana y/o el medio ambiente.

2. Si los resultados de los análisis no superan los valores límite establecidos, podrán considerarse como valorizables. Estos análisis han de ser realizados por un laboratorio acreditado por el Departamento de Medio Ambiente y Vivienda en el ámbito de los residuos.

La frecuencia de muestreo será diaria en el plazo de una semana y quincenal en el plazo de tres meses.

### **Usos admisibles y condiciones de aplicación**

Los usos admisibles de las escorias siderúrgicas valorizables como árido en obra civil y las condiciones de aplicación se resumen en la siguiente tabla.

---

<sup>23</sup> Corregida por la UNE-EN 12457-4:2003. *Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 L/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño).*

<sup>24</sup> *Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.*

**Tabla 4.1.3-1. Condiciones de aplicación de las escorias según uso. Decreto 32/2009, de 24 de febrero. Cataluña.**

| Uso  | Condiciones de aplicación   |
|--|---|
| Como base, subbase y explanada mejorada de carreteras, vías públicas o privadas, urbanización de áreas industriales y estabilización física de suelos            | <p>La capa de escoria siderúrgica valorizable no puede superar un grueso de 70 cm.</p> <hr/> <p>Debe disponerse de una capa de rodamiento asfáltico, de hormigón, o una capa impermeable en la superficie.</p> <hr/> <p>Cuando la construcción de las capas estructurales se realice mediante mezcla de las escorias siderúrgicas valorizables con otros materiales tradicionales, el grueso de 70 cm se puede corregir al alza en función del porcentaje de escorias siderúrgicas valorizables que se hayan utilizado en la mezcla.</p>  |
| En la nivelación de terrenos y terraplenes   | <p>Con un grueso máximo de escorias siderúrgicas valorizables de 1 m por término medio cada 1.000 m<sup>2</sup> de extensión, sin sobrepasar los 2 m de altura, y siempre que la superficie sea recubierta después con una capa impermeable de una permeabilidad inferior a 10<sup>-9</sup> m/s.</p> <hr/> <p>Cuando la nivelación se realice mediante mezcla de las escorias siderúrgicas valorizables con otros materiales tradicionales, el grueso de 2 m de altura se puede corregir al alza en función del porcentaje de escorias siderúrgicas valorizables que se hayan utilizado en la mezcla.</p> |
| En relleno y restauración de áreas degradadas por actividades extractivas sobre suelos arcillosos o en restauración de arcillas                                  | <p>Hay que hacer un sellado adecuado de la superficie y un drenaje de las aguas pluviales.</p>  |
| Como material para capa de rodamiento con mezcla bituminosa, en carreteras y vías de tráfico públicas o privadas.  | -   |
| Como sub-balasto de vías férreas sobre suelos arcillosos o poco permeables   | <p>La capa de escoria siderúrgica valorizable no debe superar los 50 cm de grueso, siempre que ésta esté confinada, disponga de un cubrimiento superficial impermeable, y que esté recubierta por una capa superior de balasto</p>  |
| Relleno del interior de cajones de hormigón cerrados, utilizados para la construcción de diques en obras portuarias.   | -   |
| Como material de la capa de asentamiento en el sellado de depósitos controlados, así como en el recubrimiento de las pistas del interior del vaso de deposición. | -   |

No obstante, la utilización de escorias en obra civil para usos no previstos puede ser autorizada por la Agencia de Residuos, previa solicitud del productor en la que se acredite que la actuación propuesta es ambientalmente correcta, no afecta a la salud de las personas y no afecta a la calidad de las aguas ni a los bienes que integran el dominio público hidráulico, el suelo y los recursos naturales.

La utilización de las escorias siderúrgicas como materia prima de otras producciones como en la fabricación del cemento u hormigón, queda sometida al régimen especial de los subproductos regulado en el artículo 29 del *Decreto 93/1999, de 6 de abril, sobre procedimientos de gestión de residuos*, y no precisa de la declaración regulada del decreto.

### **Usos prohibidos**

Las escorias siderúrgicas valorizables no se pueden utilizar como árido en obra civil en los siguientes casos, salvo autorización expresa de la Agencia de Residuos de Cataluña:

- a) En las zonas inundables por un periodo de retorno de 100 años. La delimitación de la inundabilidad es la realizada por la Agencia Catalana del Agua en el estudio de delimitación de zonas inundables, y en los estudios de planificación del espacio fluvial que se vayan generando por la agencia.
- b) En terrenos que tengan el nivel freático a menos de 2,5 m de la superficie en la que se tengan que aplicar las escorias.
- c) En terrenos situados a menos de 100 m de distancia de pozos de abastecimiento de agua potable a poblaciones.

### **4.1.4 Conclusiones**

Los decretos identificados tienen por objeto el establecimiento del régimen jurídico aplicable a la gestión y valorización de escorias de acería, concretamente, de las escorias negras procedentes de la fabricación de acero al carbono en hornos de arco eléctrico. Solo Cantabria considera otros tipos de escoria, entre las que se incluyen las escorias blancas de acero al carbono y las escorias de silicomanganeso, ambas objeto también del presente estudio. Cabe señalar que ninguno de los decretos existentes en nuestro país regula la valorización y el uso de las escorias de cobre.

El uso de las escorias en general se permite como árido en obra civil, en diversas aplicaciones ligadas y no ligadas y como materia prima en la fabricación de productos de la construcción. En las tres CCAA, pese a que se permite el uso de las escorias como árido en aplicaciones no ligadas, para la mayor parte de este tipo de aplicaciones se requiere su realización bajo capas que garanticen cierta impermeabilización.

Además de su empleo en obra civil, País Vasco, Cataluña y Cantabria incluyen el uso de las escorias para la cubrición de vertederos y, en el caso de las dos últimas, también para la restauración de áreas degradadas.

Entre las condiciones de aplicación que proponen las CCAA, cabe señalar que todas establecen un espesor máximo de aplicación de 70 cm en aplicaciones como base, subbase y explanadas mejoradas en la construcción de carreteras y urbanización de áreas industriales, si bien en el País Vasco no se recoge de manera específica en el decreto, sino en su guía de aplicación.

Cataluña además limita el espesor a 1 m, por término medio cada 1.000 m<sup>2</sup> (sin sobrepasar los 2 m), en nivelación de terrenos y terraplenes y, a 50 cm, si se emplea como sub-balasto. En el caso de la escoria de SiMn, Cantabria indica un espesor máximo de 40 m en carreteras y vías públicas o privadas de tráfico rodado.

Se prohíbe de forma general el uso de las escorias en zonas de especial protección y se limita su utilización en escenarios que puedan implicar un contacto directo con el agua mediante medidas de protección específicas, como capas impermeables.

Comparando las regulaciones autonómicas, se observa que únicamente País Vasco establece valores límite de contenido total de metales para aquellas aplicaciones que impliquen contacto directo con suelo, mientras que todas establecen valores límite de lixiviación de acuerdo con la norma UNE-EN 12457-4:2003. *Caracterización de residuos. Lixiviación.* Los valores límite impuestos coinciden con los criterios de aceptación de residuos inertes en vertederos, excepto el contenido en fluoruros que presenta un valor superior de 18 mg/kg en el decreto de Cataluña y País Vasco, respecto al valor de 10 mg/kg. Además, País Vasco ha establecido un valor límite para el vanadio y para el cromo (VI), así como valores más permisivos de todos los elementos en aquellas aplicaciones que cuentan con capa totalmente impermeable (Tipo 3).

Únicamente Cantabria establece valores límite de lixiviación para parámetros orgánicos, posiblemente por la inclusión de las escorias de incineración de residuos en su decreto. No obstante, según comunicaciones con el País Vasco, las escorias de acería proceden de un proceso térmico en el que se produce la combustión completa de los compuestos orgánicos, por lo que consideran que carecen de este tipo de sustancias.

En el Anexo VI se pueden consultar los valores límite de lixiviación establecidos en la normativa de las tres CCAA, junto con los tipos de ensayo de lixiviación requeridos en cada una de ellas. En el caso de las aplicaciones ligadas, en el País Vasco no se aplican estos valores límite y en Cantabria podrán no ser de aplicación, ya que se considera acreditada su no afcción al medio. Cataluña considera este tipo de aplicaciones como subproducto, prescindiendo también de estas limitaciones.

Para el control de estos valores límite, en todas las normas se establece una frecuencia de muestreo, variable en función de la cantidad de escoria producida y de la conformidad de los resultados analíticos en el tiempo (permitiendo una menor frecuencia si se mantienen por debajo de los valores límite).

Además de estos requisitos de carácter ambiental, País Vasco requiere la realización de un ensayo para el control de la expansividad de la escoria y en Cantabria se hace referencia a la instrucción técnica de fabricación del hormigón para este uso. Por último, tanto País Vasco como Cantabria indican la necesidad de disponer del marcado CE en aquellos usos para los que resulte exigible por la legislación europea de aplicación.

En el Anexo VII se presenta un resumen de los requisitos regulados en las normas de valorización de escorias en las tres CCAA: norma, régimen jurídico de la escoria, escenarios y descripción de las aplicaciones permitidas, condicionantes y restricciones de uso, control de calidad y frecuencia de los ensayos y normas de producto que deben cumplir.

## 4.2 EN EUROPA

Varios EEMM han desarrollado normativa que regula o guías que abordan el uso de áridos derivados de residuos para ser usados como materiales de construcción, entre los que se encuentran las escorias, a través del establecimiento de criterios de lixiviación y de condiciones específicas de aplicación.



En el documento "*Análisis de la Situación Actual de la Gestión de Escorias del Sector Siderúrgico en la UE y en España y Evaluación del Cumplimiento de los Requisitos para ser Considerado Subproducto o Desclasificado como Residuo*" realizado por EMGRISA en el año 2015, se describieron las normas desarrolladas en varios Estados miembro de la UE.

En este apartado se presenta la información contenida en dicho documento teniendo en cuenta las últimas actualizaciones e incorporando la regulación de aquellas escorias objeto del presente estudio.

A modo de resumen se presenta una tabla de los EEMM que regulan el uso de alguna de las escorias presentes en este estudio y sus singularidades.

**Tabla 4.2-1. EEMM que regulan el uso de las escorias.**

| País         | Tipo de escoria   | Aplicaciones  | Límites   |
|--------------|---|---|---|
| Francia      | Escoria negra   | Como árido (ligadas y no ligadas)   | Según tipo de uso:<br>Tipo 1, 2 y 3   |
| Países Bajos | Escoria negra<br>Escoria de cobre   | Como árido (ligadas y no ligadas) y como materia prima en la fabricación de productos de construcción | Según tipo de material:<br>Conformado;<br>no conformado;<br>no conformado IBC |
| Alemania     | Escoria negra<br>Escoria de cobre   | Ligadas y no ligadas  | Según tipo de material:<br>SWS-1, SWS-2 y SWS-3                               |
| Flandes      | Todo tipo de escorias de fundición<br>(Previa declaración como materia prima) | No específica   | Según tipo de material:<br>Conformado;<br>No conformado                       |
| Italia       | Escoria negra   | Ligadas y no ligadas  | Según parámetros relevantes en la escoria.                                    |
| Suiza        | Escoria negra   | Ligadas y no ligadas  | Según parámetros  |
| Reino Unido  | Escoria negra   | Ligadas, semi-ligadas y no ligadas  | No se especifican   |

#### 4.2.1 Francia

Francia dispone de la Guía "*Acceptability of Alternative Materials in Road Construction. Environmental Assessment*". Esta guía fue desarrollada en el año 2011, a través de un grupo de trabajo compuesto por distintos organismos, como SETRA, ADEME, MEDDTL, BRGM, INERIS, INSAVALOR, etc. El propósito de la guía es desarrollar una metodología para valorar la aceptación de materiales alternativos procedentes de residuos para su uso en la construcción de carreteras, desde el punto de vista ambiental.

Un año más tarde en 2012 publicó la guía de aplicación "*Guide Sétra d'application. Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière. Les laitiers sidérurgiques*", que supone la aplicación operativa de la guía en el caso específico de las escorias siderúrgicas.

Esta última, solo se aplica a aquellos materiales fabricados a partir de escorias generadas en los centros de producción de arrabio y acero a partir de chatarra. La producción de arrabio genera escorias de alto horno, mientras que las operaciones de transformación del arrabio en acero generan escorias de convertidor. La

escoria de acería de horno de arco eléctrico (escoria negra) es, por su parte, el principal material generado durante la producción de acero a partir de la refundición de la chatarra.

**La guía del año 2012 considera las escorias de acero al carbono de horno de arco eléctrico, es decir las escorias negras, en la construcción de carreteras como materiales alternativos, siempre que cumplan las prescripciones y requisitos incluidos en la misma, tanto de manera aislada (usos no ligados) como mezclada con otros materiales o ligantes (usos ligados).**

Concretamente considera las escorias clasificadas con los códigos LER "10 02 01 Escorias de altos hornos y de acería" o "10 02 02 Escorias no tratadas".

El proceso de valorización o tratamiento de las escorias siderúrgicas incluido en la guía de 2012 comprende las etapas de enfriamiento de la escoria (lento o rápido), la fabricación de los materiales alternativos, que incluye la desferretización o desmetalización y el triturado/cribado por vía húmeda o seca, y la maduración de los materiales alternativos en caso de ser necesario mediante el riego o el volteo.

Considera la utilización de los materiales alternativos de manera aislada o mezclados con otros materiales (áridos, ligantes hidráulicos, ligantes bituminosos) pudiéndose realizar esta mezcla tanto en el mismo lugar de producción de los áridos como a pie de obra. Entre los materiales para carreteras que se pueden fabricar a partir de materiales alternativos se encuentran el árido no ligado, grava tratada con ligante hidráulico, mezclas bituminosas, y como tratamiento superficial de firmes (espesor de 1 a 2 cm).

Así mismo, se han considerado tres tipos de uso del material alternativo en la construcción de carreteras de manera **no ligada**:

- Tipo 1: hasta 3 m de espesor, bajo estructura revestida. En la guía, una estructura de carretera se considera revestida si su capa superficial se produce utilizando asfalto, mezclas bituminosas, yesos de desgaste superficial, cemento o adoquines unidos con un material ligante y si tiene una pendiente mínima del 1% en todos los puntos.

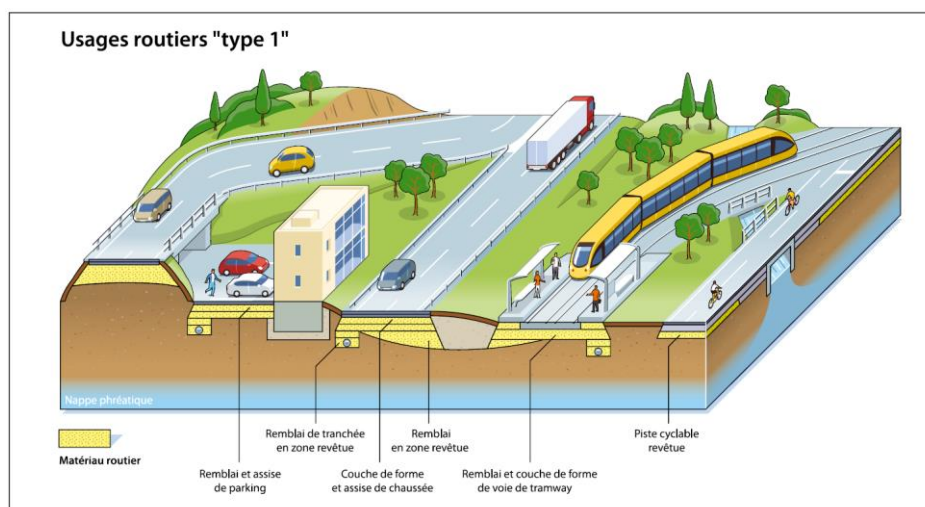


Figure 10 - Usages routiers de "type 1"

- Tipo 2: hasta 6 m de espesor, bajo estructura cubierta. En la guía, una estructura de carretera se considera cubierta si los materiales de la carretera presentes están cubiertos por al menos 30 cm de materiales naturales o equivalentes y si tiene una pendiente mínima del 5% en todos los puntos en su envoltura externa. También incluye el uso de 3 a 6 m bajo estructura revestida.

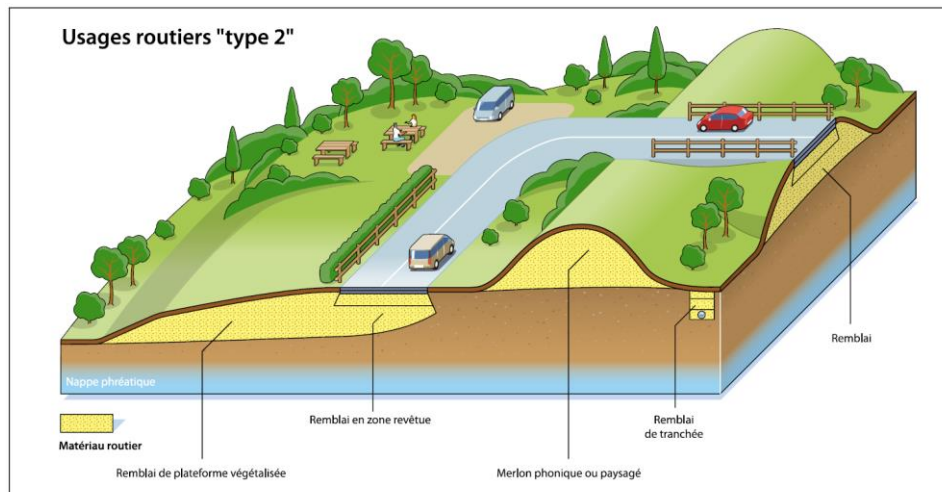


Figure 11 - Usages routiers de « type 2 »

- Tipo 3: Sin restricción de espesor. Se incluyen en esta categoría el uso de materiales para la construcción de capas bajo arcenes y aceras, rellenos localizados, caminos forestales, caminos agrícolas y caminos de sirga.

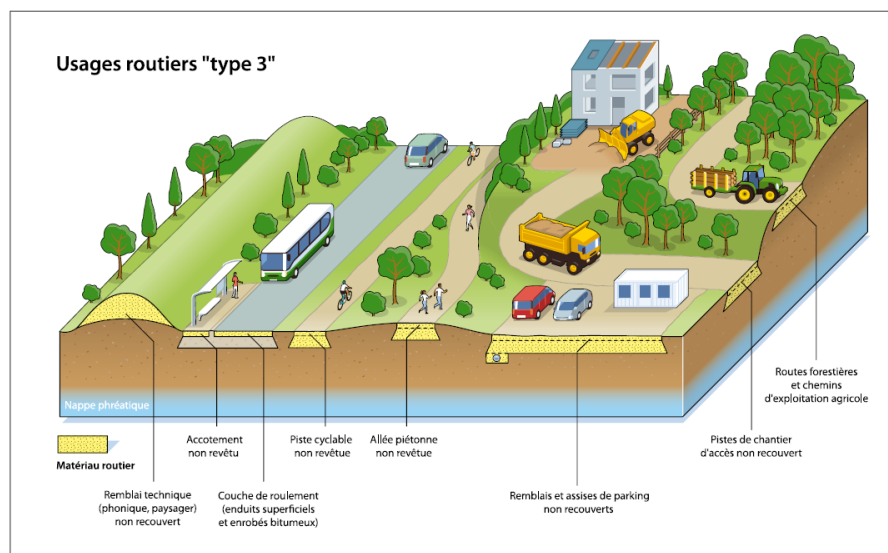


Figure 12 - Usages routiers de "type 3"

En la guía se señala que únicamente se tendrán en cuenta los materiales alternativos fabricados a partir de escoria cuya idoneidad para su uso haya sido previamente justificada. Esto significa que las propiedades geotécnicas (mecánicas y fisicoquímicas) deberán **cumplir con las normas y/o especificaciones vigentes** (normas de producto, normas de uso, guías técnicas regionales, etc.). Entre estas normas se cita el

cumplimiento de las normas francesas NF P 18-545<sup>25</sup> y NF P 11-300<sup>26</sup>, así como las normas armonizadas NF EN 13242 (áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos) y NF EN 13043 (áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales).

El **procedimiento de control de calidad** debe enumerar todos los documentos necesarios para, además de controlar el material alternativo a lo largo de su proceso de producción, demostrar el cumplimiento de los requisitos exigidos en la guía y conocer su destino final, así como todos los actores implicados con objeto de garantizar una correcta trazabilidad. La documentación debe conservarse durante al menos 3 años.

La guía proporciona una tabla de aceptabilidad ambiental que propone también **limitaciones relacionadas con el entorno inmediato y con la fase de construcción** con el objeto de lograr la protección de las aguas (zonas inundables, lagos y estanques, zonas de protección de hábitats, especies, fauna y flora silvestres, tomas de agua potable) o limitaciones en zonas de especial protección (parques nacionales, recursos hídricos protegidos, etc.), así como el almacenamiento temporal del material.

**Tabla 4.2.1-1. Usos y limitaciones de la escoria siderúrgica. Francia.**

| Limitaciones relacionadas con la naturaleza de los usos en carretera | Limitaciones relacionadas con el entorno inmediato   | Limitaciones relacionadas con la aplicación   |
|--|--|---|
| <p>Tipo 1<br/>Tipo 2</p>   | <p>A menos que un hidrogeólogo experto aconseje lo contrario, el uso de materiales alternativos está prohibido:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• En zonas inundables y a menos de 50 cm del nivel de agua más alto de los últimos 50 años o, en su defecto, del nivel de agua más alto conocido</li> <li>• A menos de 30 m de cualquier curso de agua, incluidos lagos y estanques. Esta distancia se aumenta a 60 m si el lecho del curso de agua es inferior en más de 20 m a la base de la estructura y en las zonas designadas como zonas de protección de hábitats, especies, fauna y flora silvestres</li> <li>• En perímetros de protección de las tomas de agua potable</li> <li>• En áreas cubiertas por una servidumbre de utilidad pública establecida para la protección de los recursos hídricos</li> <li>• En afloramientos cársticos</li> </ul> <p>El uso de materiales alternativos está prohibido en los parques nacionales</p> | <p>Capacidad de almacenamiento temporal limitada a 1.000 m<sup>3</sup></p> <p>Más de 1.000 m<sup>3</sup>, necesidad de opinión de un experto hidrogeólogo</p> |

<sup>25</sup> NF P 18-545 Áridos: elementos de definición, conformidad y codificación” define las reglas generales para realizar controles de áridos.

<sup>26</sup> C NF P 11-300 Clasificación de los materiales que se pueden utilizar en la construcción de terraplenes y capas de las infraestructuras viarias. 1992.

| Limitaciones relacionadas con la naturaleza de los usos en carretera | Limitaciones relacionadas con el entorno inmediato  | Limitaciones relacionadas con la aplicación |
|--|---|---|
| Tipo 3, pH ≤ 12  | El uso de materiales alternativos está prohibido en los parques nacionales  | Sin limitaciones                            |
| Tipo 3, pH > 12  | <p>A menos que un hidrogeólogo experto aconseje lo contrario, el uso de materiales alternativos está prohibido:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A menos de 30 m de cualquier curso de agua, incluidos lagos y estanques. Esta distancia se aumenta a 60 m si la elevación del lecho del curso de agua es inferior en más de 20 m a la base de la estructura y en áreas designadas como áreas para la protección de hábitats, especies, fauna y flora silvestres</li> <li>• En perímetros de protección de las tomas de agua potable</li> <li>• En áreas cubiertas por una servidumbre de utilidad pública establecida para la protección de los recursos hídricos</li> </ul> <p>El uso de materiales alternativos está prohibido en los parques nacionales</p> | Sin limitaciones                            |

Los parámetros ambientales y los valores límite de lixiviación de la guía que permiten decidir sobre la conformidad de los materiales alternativos derivados de la escoria, se deben mencionar claramente en el procedimiento de control de calidad.

Para verificar que se cumplen los requisitos para el material alternativo, sus características deben ser monitoreadas y medidas regularmente. Las pruebas de lixiviación se realizarán de acuerdo con la norma NF EN 12457-4<sup>27</sup>.

Los resultados obtenidos se deben comparar con los valores límite presentes en el Anexo A de la guía, con objeto de evaluar el cumplimiento ambiental de los lotes de materiales alternativos fabricados por la instalación, y determinar el destino y las condiciones apropiadas de uso de estos materiales. Los valores límite que no deben ser superados para cada uso propuesto son los indicados a continuación:

**Tabla 4.2.1-2. Valores límite de lixiviación asociados al tipo de uso (mg/kg de ms). Francia.**

| Parámetro   | Uso Tipo 1.                                     | Uso Tipo 2.  | Uso Tipo 3.                |
|-------------|---|--|----------------------------|
|             | Hasta 3 m de espesor, bajo estructura revestida | Hasta 6 m de espesor, bajo estructura cubierta o de 3 a 6 m bajo estructura revestida. | Sin restricción de espesor |
| Arsénico*** | 0,6   | 0,6  | 0,6                        |

<sup>27</sup> NF UNE 12457-4: Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 L/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño).

| Parámetro           | Uso Tipo 1.                                     | Uso Tipo 2.  | Uso Tipo 3.                |
|---------------------|---|--|----------------------------|
|                     | Hasta 3 m de espesor, bajo estructura revestida | Hasta 6 m de espesor, bajo estructura cubierta o de 3 a 6 m bajo estructura revestida. | Sin restricción de espesor |
| Bario               | 36  | 25   | 25                         |
| Cadmio***           | 0,05  | 0,05   | 0,05                       |
| Cromo total**       | 4   | 2  | 0,6                        |
| Cromo hexavalente** | 1,2   | 0,6  | -                          |
| Cobre***            | 3   | 3  | 3                          |
| Mercurio***         | 0,01  | 0,01   | 0,01                       |
| Molibdeno           | 5,6   | 2,8  | 0,6                        |
| Níquel***           | 0,5   | 0,5  | 0,5                        |
| Plomo***            | 0,6   | 0,6  | 0,6                        |
| Antimonio***        | 0,08  | 0,08   | 0,08                       |
| Selenio             | 0,5   | 0,4  | 0,1                        |
| Zinc***             | 5   | 5  | 5                          |
| Fluoruro            | 60  | 30   | 13                         |
| Cloruro*            | 10.000  | 5.000  | 1.000                      |
| Sulfato*            | 10.000  | 5.000  | 1.300                      |

\*Para que se consideren conformes, sólo deben respetarse los valores asociados con los aniones cloruro y sulfato. El cumplimiento del valor límite para la fracción soluble total en la Guía Sétra (marzo de 2011) no es relevante para los materiales fabricados a partir de escorias (véase el apartado 2.1.6)

\*\*Si el valor de Cr hexavalente es superior al valor de Cr total, el valor por defecto para el cromo hexavalente es el valor obtenido para el Cr total.

\*\*\*Si se supera el valor límite de este parámetro, será posible realizar una prueba de percolación para demostrar la conformidad del lote con los umbrales de la guía metodológica de Sétra (marzo de 2011).

Tal y como se aprecia en la tabla anterior, si se supera alguno de los valores límite de lixiviación (nivel 1 de estudio de carácter obligatorio) de As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb o Zn, la guía recoge la opción de realizar una prueba de percolación (nivel 2 de estudio) para demostrar la conformidad del lote con los umbrales recogidos en la guía metodológica SETRA de 2011<sup>28</sup>, cuyos valores límite se especifican en la siguiente tabla:

**Tabla 4.2.1-3. Valores límite de percolación asociados al tipo de uso (L/S=10 L/kg). Francia.**

| Parámetro <sup>29</sup> | Uso Tipo 1.                             | Uso Tipo 2.                            |
|-------------------------|---|--|
|                         | Bajo estructura revestida (mg/kg de ms) | Bajo estructura cubierta (mg/kg de ms) |
| Arsénico (As)           | 0,8                                     | 0,5                                    |
| Bario (Ba)              | 56                                      | 28                                     |
| Cadmio (Cd)             | 0,32                                    | 0,16                                   |

<sup>28</sup> Guide SETRA. Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière- Évaluation environnementale. 2011.

<sup>29</sup> Pruebas de percolación conforme con la norma NF CEN/TS 14405.

| Parámetro <sup>29</sup> | Uso Tipo 1.                                | Uso Tipo 2.                               |
|-------------------------|--|---|
|                         | Bajo estructura revestida<br>(mg/kg de ms) | Bajo estructura cubierta<br>(mg/kg de ms) |
| Cromo total (Cr)        | 4  | 2   |
| Cobre (Cu)              | 50   | 50  |
| Mercurio (Hg)           | 0,08                                       | 0,04                                      |
| Molibdeno (Mo)          | 5,6  | 2,8                                       |
| Níquel (Ni)             | 1,6  | 0,8                                       |
| Plomo (Pb)              | 0,8  | 0,5                                       |
| Antimonio (Sb)          | 0,4  | 0,2                                       |
| Selenio (Se)            | 0,5  | 0,4                                       |
| Zinc (Zn)               | 50   | 50  |
| Fluoruro                | 60   | 30  |
| Cloruro                 | 10.000                                     | 5.000                                     |
| Sulfato                 | 10.000                                     | 5.000                                     |

Estos resultados se deberán presentar a la DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) que supervisará la instalación de producción de materiales alternativos. En este caso, los usos autorizados de la carretera, así como las limitaciones relacionadas con el entorno inmediato de la estructura y con la aplicación de los materiales durante la fase de construcción, tendrán que ser estudiados caso por caso y validados por la DREAL.

En dicha guía se indica que estos valores límite se determinaron en base a una modelización (relación matemática) del potencial impacto derivado del uso de las escorias sobre las aguas subterráneas, cuyo objetivo era determinar la liberación de sustancias desde una estructura (fuente) asegurando el cumplimiento de una determinada calidad de las aguas subterráneas aguas abajo, para una determinada aplicación (impacto).

Se definieron dos escenarios típicos distinguiendo, por un lado, pavimento cubierto o subcapas de arcén y, por otro lado, terraplenes o espaldones cubiertos, estableciendo una serie de hipótesis de cálculo<sup>30</sup>. Asimismo, se realizó un análisis de sensibilidad para aquellos parámetros con mayor influencia en el modelo como: dimensiones de la estructura, índices de infiltración del agua de lluvia a través de la estructura, índices de infiltración del agua de lluvia a través de los suelos circundantes; presencia de una o dos estructuras cercanas.

<sup>30</sup> Hipótesis:

- transferencia de contaminantes a las aguas subterráneas dentro de un medio poroso;
- interacción nula con los suelos atravesados;
- infiltración vertical desde la fuente (estructura) hasta el objetivo (agua subterránea);
- precipitaciones medias efectivas para el territorio metropolitano (Francia continental);
- cumplimiento de la calidad del agua destinada al consumo humano

Conociendo los factores de atenuación entre la fuente y el punto de cumplimiento y fijando el valor objetivo de calidad del agua para un elemento determinado (en términos de concentración), se puede determinar la concentración de cada elemento que debería cumplir la estructura. Los valores límite, expresados en cantidades acumuladas liberadas, se derivan de estas concentraciones. A este respecto, se consideraron dos hipótesis:

- una hipótesis conservadora, basada en considerar una liberación constante para cada elemento (hipótesis que abarca todos los comportamientos de los elementos observados experimentalmente),
- una hipótesis más convencional que limita las cantidades liberadas a la mitad de las obtenidas considerando una liberación constante, expresada en términos de exposición al agua con una relación de L/S de 10. No obstante esta hipótesis se limitó únicamente a los elementos muy móviles (sales).

Si se supera alguno de los límites citados anteriormente o los ensayos asociados no parecen apropiados para la naturaleza de la sustancia, la guía deja la posibilidad de justificar su uso mediante la elaboración de un estudio específico (nivel 3 de estudio) que demuestre su no afección y que cuente con la colaboración y/o respaldo de las principales asociaciones del sector, organismos públicos de investigación o asociaciones medio ambientales.

Por otra parte, la frecuencia de los muestreos es idéntica a la establecida en el País Vasco, descrita en su apartado correspondiente.

El método de generación de los diversos tipos de escoria de acero, en forma de roca mineral fundida a muy altas temperaturas (todas del orden de 1.500°C), no permite la presencia de constituyentes orgánicos durante estos procesos industriales. Por consiguiente, estos elementos no son objeto de ningún requisito de vigilancia específico en la guía de aplicación.

Finalmente, se especifica que el procedimiento para garantizar la calidad ambiental de los materiales alternativos debe ser parte del sistema de control de calidad de aquellas empresas que los producen o comercializan. Este procedimiento deberá describir las principales etapas de la fabricación y el tratamiento de la escoria con objeto de conocer mejor las características y las posibles consecuencias de su aplicación.

#### 4.2.2 Países Bajos

En los Países Bajos, con objeto de proteger el medio ambiente y la salud de las personas, la utilización de materiales para la construcción no diferencia entre el uso de materiales según el origen, por lo que se requiere que todos los materiales pétreos cumplan las mismas condiciones sin hacer distinción, por tanto, entre materiales y residuos.

Los criterios de protección del medio ambiente debido al empleo de los materiales de la construcción se han desarrollado en base a evaluaciones de riesgo de distintos escenarios, primero bajo el *Decreto de Materiales de Construcción holandés (Building Material Decree (BMD))*, desde 1995 a 2008 y actualmente en el marco del *Decreto de Calidad del Suelo Holandés (Soil Quality Decree (SQD))* que sustituyó al BMD en 2008.



El actual decreto establece tres categorías de aplicaciones para los materiales de construcción:

- a) **materiales conformados,**
- b) **materiales no conformados y**
- c) **materiales no conformados IBC,** que son materiales granulares que únicamente pueden ser empleados con medidas de aislamiento, gestión y control porque su aplicación sin estas medidas podría generar un daño en el medio ambiente.

Así mismo, define “*Building Material*” (BM) como aquel material que está destinado a ser utilizado en una obra y en el que el total de concentración de silicio, calcio o aluminio juntos constituye más del 10% en peso del material, con la excepción de vidrio, aluminio metálico, suelo excavado o material dragado.

En base a esta definición, se entiende que las escorias que cumplan estos requisitos estarán dentro del alcance de la norma holandesa.

Pero a lo indicado en la Ley de ordenación del medio ambiente (Besluit Omgevingsrecht<sup>31</sup>), en la que se prohíbe la aplicación en el suelo de residuos si no se ha concedido ninguna exención en virtud del Decreto sobre exenciones de la prohibición de vertidos<sup>32</sup>, se ha tenido acceso a una página oficial promovida por el antiguo Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente de Países Bajos, actual Ministerio de Infraestructuras y Gestión de los Recursos Hídricos, en la que en su registro de materiales de construcción (BM)<sup>33</sup> incluye las escorias de acero entre las que se encuentran explícitamente las escorias de horno de arco eléctrico. Es decir, **se consideran las escorias negras de acería, pero no se citan las escorias blancas. Así mismo, en el registro también constan las escorias de cobre.**

Por otra parte, define “*Work*” (Obra) como trabajos de construcción, trabajos de construcción de carreteras o trabajos de ingeniería hidráulica u otro uso funcional de un material de construcción, con la excepción de relleno de aguas superficiales y rellenos de tierra para urbanizaciones y parques empresariales.

En base a esta definición, se entiende que también se incluye el uso de los materiales de la construcción para la fabricación de cemento y hormigón, es decir, como materia prima para la fabricación de productos de construcción y como árido en aplicaciones ligadas, respectivamente.

En el Capítulo 3 del decreto se desarrollan los requisitos aplicables a los materiales de construcción (BM). En dicho capítulo se indica que se prohíbe la comercialización y uso de estos materiales a menos que los valores máximos de composición y emisión se hayan determinado en base a lo establecido en el Anexo A del *Decreto de Calidad del Suelo*<sup>34</sup>, se haya verificado que se cumplen dichos valores y se haya obtenido una declaración ambiental por parte del organismo correspondiente.

---

<sup>31</sup> <https://wetten.overheid.nl/BWBR0027464/2021-07-01>

<sup>32</sup> Preguntas más frecuentes. Materiales de la construcción. [In welke gevallen mag ik afvalstoffen ook als bouwstof gebruiken? - Bodem+ \(bodemplus.nl\)](https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/bodemassen-en-slakken/gebruiken? - Bodem+ (bodemplus.nl))

<sup>33</sup> <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/bodemassen-en-slakken>

<sup>34</sup> *Regeling bodemkwaliteit*: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0023085/2018-11-30>

Los valores de emisión sólo se establecieron para sustancias inorgánicas. No hay pruebas disponibles de lixiviación para sustancias orgánicas. Hasta que se desarrollen este tipo de pruebas, los valores límite de composición para compuestos orgánicos son los siguientes:

**Tabla 4.2.2-1. Valores máximos de composición de parámetros orgánicos del Anexo A, perteneciente a la Sección 3.3 del Reglamento de Calidad del Suelo. Países Bajos.**

| Parámetro                   | Materiales conformados (mg/kg ms) |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Benceno                     | 1                                 |
| Etilbenceno                 | 1,25                              |
| Tolueno                     | 1,25                              |
| Xileno <sup>1</sup>         | 1,25                              |
| Fenol                       | 1,25                              |
| Naftaleno                   | 5                                 |
| Fenantreno                  | 20                                |
| Antraceno                   | 10                                |
| Fluoranteno                 | 35                                |
| Criseno                     | 10                                |
| Benzo(a)antraceno           | 40                                |
| Benzo(a)pireno              | 10                                |
| Benzo(k)fluoranteno         | 40                                |
| Indeno(1,2,3cd)pireno       | 40                                |
| Benzo(ghi)perileno          | 40                                |
| HAP total <sup>2</sup>      | 50                                |
| PCB <sup>3</sup>            | 0,5                               |
| Aceite mineral <sup>4</sup> | 500                               |
| Amianto                     | 100                               |

<sup>1</sup>Suma de m-xileno, p-xileno y o-xileno

<sup>2</sup>Suma de naftaleno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, criseno, benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(k)fluoranteno, indeno(1,2,3cd)pireno, benzo(ghi)perileno

<sup>3</sup>Suma de PCB 28,52,101,118,138,153,180

<sup>4</sup>Suma de alcanos (ramificados o no)

En cuanto a los parámetros inorgánicos, se establecen valores límite de emisión para las tres categorías de materiales: materiales conformados, materiales no conformados, y materiales de construcción IBC. En la siguiente tabla se presentan estos valores:

**Tabla 4.2.2-2. Valores máximos de emisión de parámetros inorgánicos del Anexo A, perteneciente a la Sección 3.3 del Reglamento de Calidad del Suelo. Países Bajos.**

| Parámetro      | Materiales conformados (mg/m <sup>2</sup> ) | Materiales no conformados (mg/kg ms) | Materiales no conformados IBC (mg/kg ms) |
|----------------|---|--------------------------------------|--|
| Antimonio (Sb) | 8,7   | 0,32                                 | 0,7                                      |
| Arsénico (As)  | 260   | 0,9                                  | 2  |
| Bario (Ba)     | 1.500                                       | 22                                   | 100                                      |
| Cadmio (Cd)    | 3,8   | 0,04                                 | 0,06                                     |
| Cromo (Cr)     | 120   | 0,63                                 | 7  |
| Cobalto (Co)   | 60  | 0,54                                 | 2,4                                      |
| Cobre (Cu)     | 98  | 0,9                                  | 10                                       |

| Parámetro                  | Materiales conformados (mg/m <sup>2</sup> ) | Materiales no conformados (mg/kg ms) | Materiales no conformados IBC (mg/kg ms) |
|----------------------------|---|--------------------------------------|--|
| Mercurio (Hg)              | 1,4   | 0,02                                 | 0,08                                     |
| Plomo (Pb)                 | 400   | 2,3                                  | 8,3                                      |
| Molibdeno (Mo)             | 144   | 1                                    | 15                                       |
| Níquel (Ni)                | 81  | 0,44                                 | 2,1                                      |
| Selenio (Se)               | 4,8   | 0,15                                 | 3  |
| Estaño (Sn)                | 50  | 0,4                                  | 2,3                                      |
| Vanadio (V)                | 320 <sup>1</sup>                            | 1,8 <sup>1</sup>                     | 20                                       |
| Zinc (Zn)                  | 800   | 4,5                                  | 14                                       |
| Bromo (Br)                 | 670 <sup>2</sup>                            | 20 <sup>2</sup>                      | 34                                       |
| Cloruro (Cl)               | 110.000 <sup>2</sup>                        | 616 <sup>1,2</sup>                   | 8.800                                    |
| Fluoruro (F)               | 2.500 <sup>2</sup>                          | 55 <sup>2</sup>                      | 1.500                                    |
| Sulfato (SO <sub>4</sub> ) | 165.000 <sup>2</sup>                        | 2.430 <sup>2</sup>                   | 20.000                                   |

<sup>1</sup>No obstante, los valores máximos de emisión establecidos en la Tabla 1, cuando se utilicen materiales de construcción en cursos de agua superficiales enumerados en el Anexo O de este Reglamento, se aplicará un valor máximo para el vanadio de 460 mg/m<sup>2</sup> (conformado), y 4,6 mg/kg de materia seca (no conformado) y para el cloruro de 1.070 mg/kg de materia seca (no conformado).

<sup>2</sup>Como excepción a los valores máximos de emisión establecidos en la Tabla 1, cuando se utilicen materiales de construcción en contacto directo (o posible contacto) con agua de mar o agua salobre que contenga cloro de forma natural superando los 5.000 mg/l, se aplicará; a) los valores máximos de emisión de cloruro y bromuro, y b) los valores máximos de emisión establecidos en la tabla para el fluoruro y el sulfato multiplicados por un factor de 4.

Si el lote cumple estos valores de emisión máximos se expedirá un **certificado de calidad ambiental** donde debe figurar el nombre y la dirección de quien expide el certificado, el material de construcción, el uso y las condiciones de aplicación.

Se permiten tres tipos de **declaración ambiental** para demostrar la calidad de un material de la construcción:

- calidad de cada lote de material a través de una inspección, siendo el muestreo realizado por una entidad reconocida;
- una declaración de calidad reconocida mediante un certificado del producto emitido por un organismo de certificación reconocido y la aprobación por parte de la administración;
- mediante una declaración propia del fabricante, sin controles externos por parte de un organismo de certificación reconocido ni el reconocimiento de la declaración por la administración (sólo recomendado para materiales que no generan riesgo).

Los materiales de construcción y los productos de construcción pueden ser reconocidos por diferentes distintivos de calidad, como el marcado CE, el certificado NL-BSB o la certificación KOMO, siendo los dos primeros de carácter obligatorio.

- El marcado CE asegura la libre circulación de productos de construcción en el mercado europeo, es obligatorio de acuerdo con el *Reglamento de Productos de Construcción (RCP)*<sup>7</sup> y certifica la conformidad del producto con las prestaciones declaradas establecidas en las normas europeas armonizadas EN.

- El certificado NL-BSB asegura la conformidad del material de construcción con el *Decreto de Calidad del Suelo* holandés (*Soil Quality Decree (SQD)*), estableciendo fundamentalmente requisitos medioambientales.
- KOMO es un organismo de certificación independiente de los Países Bajos. De carácter voluntario, la certificación KOMO asegura que los productos y procesos cumplen las leyes y regulaciones de calidad y seguridad en el sector de la construcción estableciendo requisitos técnicos, medioambientales, de sistema y de aseguramiento de la calidad. Puede incluir también los requisitos para el certificado NL-BSB.

Los estándares en los que se basan los certificados NL-BSB y KOMO son las guías de evaluación nacionales (BRL). Estas guías pueden estar disponibles o no para un determinado producto y aplicación y cubren todas las garantías que no alcanza el mercado CE, como por ejemplo la conformidad con el *Decreto de Calidad del Suelo* holandés.

En relación con las escorias objeto de estudio, se han identificado las siguientes guías de evaluación holandesas:

- *Guía de Evaluación Nacional BRL 9345 para el certificado de producto NL BSD® para Escorias y Mezclas de Escorias como material en obras de ingeniería civil (Nationale Beoordelingsrichtlijn voor het NL BSB productcertificaat voor Slakken en slakmengsels voor toepassing in GWW-werken)*, de octubre de 2015

Esta guía sustituye a las antiguas BRL 9305 (escoria de alto horno) y BRL 9343 (escoria de cobre) y reemplaza los requisitos ambientales de las guías BRL 9304 (escoria de fósforo), BRL 9310 (escoria de convertidor) y 9328 (escoria negra de acero).

La BRL 9345 contempla diferentes escorias, entre las que se encuentran las **escorias negras de acero** (*ELO-staalslak*) y las **escorias de cobre** (*koperslak*). No se permite la utilización de la escoria negra en obras costeras o de ribera, ni en contacto con agua, salvo las escorias de acero con un tamaño granulométrico d/D, siendo el tamaño mínimo  $d \geq 31,5\text{mm}$  y máximo  $D \geq 63\text{mm}$ .

Podrán considerarse como material de construcción no conformado o material no conformado IBC si cumplen los valores máximos de emisión de parámetros inorgánicos, así como los valores máximos de contenido de parámetros orgánicos y amianto indicados en el Anexo A y B del *Reglamento de Calidad del Suelo* descritos anteriormente, y realizados bajo las normas pertinentes en cada caso.

Podrán ser consideradas como material de construcción conformado si, además de los valores máximos de emisión y contenido, cumplen con los tamaños de partícula y los requisitos de resistencia o estabilidad especificados en la guía en función de la pérdida de masa.

La emisión de los parámetros inorgánicos debe determinarse conforme a la norma NEN 7373 (ensayo de columna) o NEN 7383 (ensayo de columna simplificado), pudiendo recurrir a la norma NEN 7371 (ensayo de

disponibilidad). Para materiales conformados se determinará según la norma NEN 7375 (ensayo de difusión en materiales conformados).

En cuanto a los requisitos ambientales, las escorias y sus mezclas como material de construcción deben evaluarse según el tipo de siderurgia de origen, el proceso de producción concreto y el tipo de enfriamiento.

La guía establece también la necesidad de implementar un sistema de calidad para el productor de los materiales en el cual se describa el proceso de fabricación, el control de la calidad, el plan de muestreo, los pesajes y su calibración, los registros documentales necesarios, y que detecte las posibles deficiencias en el material.

El organismo de inspección correspondiente evaluará la correcta aplicación del sistema de calidad, así como toda la documentación generada verificando que cumple con todos los requisitos de la guía. Así mismo la guía también incluye requisitos para el organismo de certificación y el personal que llevará a cabo la inspección.

- *Guía de Evaluación Nacional BRL 9310 para el certificado de producto KOMO® para Escorias y Mezclas de Escorias como material en obras de ingeniería civil (Beoordelingsrichtlijn voor het KOMO productcertificaat voor Slakken en slakmengsels voor toepassing in GWW-werken)*, de 2019.

Esta guía reemplaza los requisitos técnicos de las guías BRL 9304 (escoria de fósforo), BRL 9310 (escoria de convertidor) y 9328 (escoria negra de acero).

La BRL 9310 contempla diferentes escorias, entre las que se encuentran las **escorias negras de acero** (*ELO-staalslak*) y las **escorias de cobre** (*koperslak*).

Entre las aplicaciones, se recoge la utilización de la escoria de acero en capas de firme, en hormigón no estructural o en mezclas bituminosas. La escoria de cobre puede utilizarse únicamente en escolleras, capas de balasto o capas filtrantes. Estos usos también se contemplan para la escoria de acero, pero únicamente aquellas con un tamaño granulométrico  $d/D$ , siendo el límite inferior nominal  $d \geq 31,5\text{mm}$  y superior  $D \geq 63\text{mm}$ .

La guía recoge los requisitos técnicos para su utilización en función de la aplicación final, dictando los tamaños granulométricos adecuados, así como los porcentajes de mezcla en su caso, en base a distintas normas armonizadas europeas como la UNE-EN 14227<sup>35</sup>, UNE-EN 13242<sup>36</sup>, UNE-EN 12620<sup>37</sup>, entre otras.

---

<sup>35</sup> UNE-EN 14227-1:2014. *Mezclas tratadas con conglomerante hidráulico. Especificaciones. Parte 1: Mezclas granulares tratadas con cemento.*

<sup>36</sup> UNE-EN 13242:2003+A1:2008. *Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales del firme.*

<sup>37</sup> UNE-EN 12620:2003+A1:2009. *Áridos para hormigón.*

La guía establece también la necesidad de implementar un sistema de calidad para el productor de los materiales en el cual se describa el proceso de fabricación, el control de la calidad, el plan de muestreo, los registros documentales necesarios, y que detecte las posibles deficiencias en el material.

El organismo de inspección correspondiente evaluará la correcta aplicación del sistema de calidad, así como toda la documentación generada verificando que cumple con todos los requisitos de la guía. Así mismo la guía también incluye requisitos para el organismo de certificación y el personal que llevará a cabo la inspección.

Los documentos de entrega asociados al certificado de producto deben incluir la referencia de certificación KOMO, el nombre del titular, el lugar de producción, el tipo de producto, su composición y la aplicación final.

#### 4.2.3 Alemania

El Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear (BMUB) se encuentra desarrollando las normas federales de evaluación de los residuos minerales y subproductos industriales mediante el *Decreto sobre Materiales Substitutivos de Construcción, por el que se modifica el Decreto Federal de Protección del Suelo y Suelos Contaminados y el Decreto de Vertederos y la Ordenanza de Residuos Comerciales*, de 2021<sup>38</sup>.

El objetivo es garantizar de forma global y coordinada, el uso correcto y seguro de los materiales de construcción para la aplicación de dichos materiales en el suelo. Los materiales de construcción sustitutivos incluyen tanto materiales naturales como residuos minerales procedentes de las actividades de construcción y de procesos industriales o plantas de tratamiento de residuos minerales. Es decir, este decreto regula el uso de materiales de construcción, independientemente de su origen.

En el reglamento se establecen las siguientes definiciones:

**Material de construcción sustitutivo de los minerales:** material de construcción mineral que,

a) como **residuo o subproducto:**

i) se produce en plantas de transformación, o

ii) se produce en el curso de trabajos de construcción como la demolición, el desmantelamiento, la reconstrucción, la ampliación, la nueva construcción y el mantenimiento

b) es apto y está destinado, directamente o después del tratamiento, a ser incorporado a estructuras técnicas; y

c) se encuentre, directamente o tras su transformación, entre las sustancias mencionadas en el reglamento.

---

<sup>38</sup>*Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung*  
<https://www.bmu.de/gesetz/verordnung-zur-einfuehrung-einer-ersatzbaustoffverordnung-zur-neufassung-der-bundes-bodenschutz-und-2/>

**Estructura de ingeniería:** cualquier estructura o instalación conectada al suelo y construida de acuerdo con un método de instalación especificado en el Anexo 2 o 3, incluyendo, pero no limitado a:

- a) carreteras, caminos y zonas de aparcamiento
- (b) construcción de carreteras
- c) ferrocarriles
- d) zonas de almacenamiento, aparcamiento y otras zonas pavimentadas,
- e) zanjas para tuberías y pozos de excavación, rellenos y movimientos de tierra, por ejemplo, barreras acústicas y de privacidad, y
- f) rellenos para la estabilización de terraplenes y bermas;

Para cada uno de los materiales sustitutivos contemplados, la norma establece una clasificación en varias “Clases de Material”, definidas como las categorías de un material de construcción sustitutivo de un mineral **del mismo tipo y origen**, pero que difieren en su calidad en función de diferentes “Valores Materiales”.

Se define **Valor Material** como los valores límite especificados en el Anexo 1 del decreto para ciertos parámetros del material de construcción sustituto y valores de orientación para las concentraciones de sustancias en el sólido (contenido de la sustancia) o en el eluato (concentraciones de eluato). Estos valores límite deberán ser justificados por el productor de los materiales sustitutivos.

En relación con el tipo de materiales de construcción sustitutivos, esta norma contempla, entre otros, tanto las escorias de acería como las de cobre, definiéndolas como:

- Escoria de acería (Stahlwerksschlacke (SWS)): escoria que se acumula durante el proceso de transformación del arrabio y de la chatarra de acero en acero mediante el convertidor LD o en el horno de arco eléctrico, con la excepción de la escoria procedente de la producción de acero inoxidable. Es decir, **el decreto considera las escorias negras de acero al carbono, pero no las escorias blancas.**
- Escoria de cobre (Kupferhüttenmaterial (CUM)) escoria que se acumula durante la producción de cobre, ya sea en fragmentos o granulada.

Para las escorias, se establecen valores materiales en el eluato. Estos valores límite de lixiviación se habrán obtenido a partir de ensayos de percolación en columna mediante la norma DIN 19528 o DIN 19529 con una relación L/S de 2 L/kg.

Para ambos tipos de escorias, la norma establece dos<sup>39</sup> Clases de Material con sus respectivos Valores Materiales, que se presentan en las siguientes tablas:

---

<sup>39</sup> En versiones anteriores del reglamento se permitía una tercera clase de material con valores materiales menos restrictivos, que en la última actualización ha desaparecido. Debido al nivel de concentración de sustancias contaminantes relativamente alto en su eluato, únicamente se permitía el uso de esta clase de materiales fuera de las áreas de protección de aguas subterráneas y con limitaciones en las aplicaciones no ligadas.

**Tabla 4.2.3-1. Valores Materiales para el lixiviado de las escorias de acero. Alemania.**

| Parámetro     | Unidades | Clases de Material |        |
|---------------|----------|--------------------|--------|
|               |          | SWS-1              | SWS-2  |
| pH            | -        | 9-13               | 9-13   |
| Conductividad | μS/cm    | 10.000             | 10.000 |
| Fluoruro      | mg/l     | 1,1                | 4,7    |
| Cromo         | mg/l     | 0,110              | 0,190  |
| Molibdeno     | mg/l     | 0,055              | 0,400  |
| Vanadio       | mg/l     | 0,180              | 0,450  |

**Tabla 4.2.3-2. Valores Materiales para el lixiviado de las escorias de cobre. Alemania.**

| Parámetro     | Unidades | Clases de Material |             |
|---------------|----------|--------------------|-------------|
|               |          | CUM1               | CUM2        |
| pH            | -        | 6-10               | 6-10        |
| Conductividad | μS/cm    | 300                | 300         |
| Antimonio     | mg/l     | 0,025              | 0,025       |
| Arsénico      | mg/l     | 0,055              | 0,065       |
| Cobre         | mg/l     | 0,055              | 0,110       |
| Molibdeno     | mg/l     | 0,110              | 0,110 0,400 |

En versiones anteriores del reglamento, se clasificaban como subproducto diversos materiales<sup>40</sup>, entre los que se encontraban las escorias de acería y de cobre de Clase 1: SWS-1 y CUM-1, respectivamente; siempre que se cumpliesen todas las demás condiciones indicadas en la ley *Closed Substance Cycle Waste Management Act*<sup>41</sup> y cumpliesen el artículo 3 del decreto, relativo a las condiciones de aceptación.

En la última versión del reglamento ya no existe esta clasificación, acorde con la nueva definición de material de la construcción sustitutivo y a que, independientemente de su clasificación, ya en las versiones anteriores se indicaba que las obligaciones relativas al control de calidad eran las mismas para los subproductos que para el resto de los materiales para evitar incertidumbres jurídicas y distorsiones de la competencia.

En los Anexos del decreto alemán se especifican los distintos métodos de construcción existentes **distinguiendo entre aplicaciones ligadas** (mezcla bituminosa, hormigón, cemento, etc.) **y no ligadas** (rellenos, muros, terraplenes, sistemas de drenaje, etc.) tanto en la construcción de carreteras (anexo 2), como en instalaciones ferroviarias en el caso de la escoria negra (anexo 3).

Asimismo, se establecen dos tipos de zonas para el empleo de materiales sustitutos: fuera y dentro de áreas de protección de aguas subterráneas. Fuera de las zonas de protección del agua, se diferencian tres posibilidades de aplicación: "desfavorable" para niveles freáticos comprendidos entre 0,1 y 1 m, "favorable-arena" y "favorable-arcilla/limo/arcilla" para niveles freáticos superiores a 1 m. Dentro de las tres zonas de

<sup>40</sup> Además de las escorias de acero y cobre de Clase 1, el decreto considera como subproducto los siguientes materiales: escoria de acero inoxidable (EDS-1), escoria de alto horno (HOS), escoria granulada de alto horno (HS), escoria de de granulada de la cámara de fusión (SKG)

<sup>41</sup> <https://germanlawarchive.iuscomp.org/?p=303>



protección del agua establecidas en la normativa alemana, las posibilidades de aplicación de los materiales de construcción sustitutos de los minerales se basan en las propiedades favorables de las capas de cobertura de las aguas subterráneas (arena o limo/limo/arcilla), filtración libre de agua subterránea > 1m).

En función de lo anterior, para cada material de la construcción sustitutivo y para cada una de las Clases de Material identificadas, se incluyen tablas detalladas en las que para cada método de construcción se establece si el material puede aplicarse (+) o no (-), o si puede emplearse en condiciones restringidas (como distancias a puntos de agua, con canales de drenaje, etc.), en función de si se encuentran fuera o dentro de las zonas de protección de aguas subterráneas definidas en la normativa.

El contratista que quiera emplear materiales de sustitución deberá poder demostrar el cumplimiento de las condiciones hidrogeológicas sobre el nivel de aguas subterráneas y su protección, considerando siempre el escenario más desfavorable.

En el caso de las escorias de acería, se observa que para la categoría SWS-1, se permite el uso de la escoria para la mayor parte de las aplicaciones tanto ligadas como no ligadas, incluso en suelos permeables como arena. Para los métodos de construcción sin capa de impermeabilización, también se permite su uso, pero con condiciones más estrictas (valores límite inferiores a los establecidos en el Anexo 1 o su aplicación en suelos de menor permeabilidad). La categoría SWS-2 es similar a la 1, pero con condiciones de aplicación más restrictivas.

Se regulan otros requisitos como la obligación de notificación a la autoridad en función de las cantidades aplicadas o del tipo de zona de protección de agua.

En el decreto se regula el tipo e intervalo de las inspecciones a llevar a cabo en el control de calidad de los materiales de construcción sustitutos de minerales. El procedimiento de control de calidad incluye una prueba de idoneidad, un control de producción en fábrica y un control externo para las plantas de transformación, así como el tratamiento de los resultados de las mediciones originadas por el control de calidad en lo que respecta al cumplimiento de los valores de los materiales y la clasificación de los materiales de construcción sustitutos de los minerales.

Para la prueba de idoneidad, se requiere el ensayo de columna (DIN 19528, edición de enero de 2009), a realizar una única vez.

Para el control de producción en fábrica, se establece el control de los valores materiales en el eluato mediante prueba de columna corta (DIN 19528) o ensayo de agitación con una L/S de 2 L/kg (DIN 19529), cada 8 semanas de producción, al menos cada 10.000 toneladas iniciales, con un máximo de 18 al año para ambos tipos de escorias, permitiendo una frecuencia menor si se cumplen determinadas condiciones.

En el contexto del ensayo inicial, el organismo de control determinará si los sustitutos minerales producidos cumplen los valores materiales aplicables y si contienen contaminantes de conformidad con la tabla 2.1 del Anexo 4 del reglamento en la que se incluyen una serie de parámetros para los que no se han fijado valores materiales: pH, cloruros, sulfato, fluoruros, COD, antimonio, arsénico, cadmio, cromo, cobre, molibdeno, plomo, níquel, vanadio y zinc.

Si pueden detectarse valores para los parámetros de las tablas 2.1 y 2.2 del Anexo 4, estos parámetros con los valores de concentración detectados. también deberán documentarse en el certificado de ensayo. Y se justificará un aumento de estos valores que no tienen valores materiales, denominados valores de control.

El organismo de control expedirá al titular de la instalación de tratamiento un certificado de ensayo de la prueba de idoneidad presentada.

El explotador de la instalación de transformación no podrá comercializar materiales de construcción minerales sustitutivos hasta que haya recibido del organismo de control el certificado de prueba de idoneidad presentado.

#### 4.2.4 Flandes

En la región de Flandes (Bélgica), el empleo de materiales para su uso en la construcción se regula dentro del *Reglamento VLAREMA sobre la gestión sostenible de los ciclos de materiales y residuos, de 17 de febrero de 2012*. En el Anexo 2.2. del reglamento se establece una lista de residuos que podrán ser considerados como una materia prima, siempre que cumplan unos determinados criterios (establecidos en el Anexo 2.3), relacionados con el origen, composición, uso y aplicación.

El reglamento ha establecido cuatro posibles aplicaciones para los residuos incluidos en el mismo, correspondiendo la categoría M02 a los materiales destinados para su uso como material de la construcción.

Dentro de este grupo se ha identificado la subcategoría *M02.01. Escorias, cenizas u otros residuos pétreos, procedentes de la industria ferrosa (metales ferrosos y ferroaleaciones), de metales no ferrosos y fabricación de productos minerales no metálicos*. Es decir, el reglamento considera la posibilidad de **utilizar todo tipo de escorias de fundición**, aunque se especifica que el uso de la escoria requiere una declaración de materia prima.

En el Reglamento VLAREMA no se especifica ninguna condición respecto al uso o aplicación de los materiales para su uso en la construcción, pero sí se establecen valores límite. Concretamente en su Anexo 2.3 se establecen los valores límite de contaminantes, tanto inorgánicos como orgánicos, así como los valores de lixiviación y valores límite de inmisión para el suelo, que no deben ser superados por los residuos que pretendan emplearse como material de la construcción.

En el Anexo 2.3.2.A se establecen valores límite de contenido (o concentración) total de contaminantes, tanto inorgánicos como orgánicos, para todos los materiales de la construcción.

**Tabla 4.2.4-1. Valores límite de concentración en contaminantes. Flandes.**

| Parámetros    | Concentración total (mg/kg de materia seca) |
|---------------|---|
| Arsénico (As) | 250   |
| Cadmio (Cd)   | 10  |
| Cromo (Cr)    | 1.250                                       |

| Parámetros                   | Concentración total (mg/kg de materia seca) |
|------------------------------|---|
| Cobre (Cu)                   | 375   |
| Mercurio (Hg)                | 5   |
| Plomo (Pb)                   | 1.250                                       |
| Níquel (Ni)                  | 250   |
| Zinc (Zn)                    | 1.250                                       |
| Benceno                      | 0,5   |
| Etilbenceno                  | 5   |
| Estireno                     | 1,5   |
| Tolueno                      | 15  |
| Xileno                       | 15  |
| Benzo (a) antraceno          | 35  |
| Benzo (a) pireno             | 8,5   |
| Benzo (ghi) perileno         | 35  |
| Benzo (b) fluoranteno        | 55  |
| Benzo (k) fluoranteno)       | 55  |
| Criseno                      | 400   |
| Fenantreno                   | 30  |
| Fluoranteno                  | 40  |
| Indeno                       | 35  |
| Naftaleno                    | 20  |
| Hexano                       | 1   |
| Heptano                      | 25  |
| Aceite mineral               | 1.000                                       |
| Octano                       | 90  |
| Bifenilos policlorados (PCB) | 0,5   |

En la siguiente tabla se presentan los valores máximos de lixiviación de metales para aquellos materiales de construcción no conformados, establecidos en el Anexo 2.3.2.B del reglamento:

**Tabla 4.2.4-2. Valores límite de lixiviación de metales pesados. Flandes.**

| Parámetros    | Lixiviación <sup>(1)</sup> (mg/kg de materia seca) |
|---------------|--|
| Arsénico (As) | 0,8  |
| Cadmio (Cd)   | 0,03   |
| Cromo (Cr)    | 0,5  |

| Parámetros    | Lixiviación <sup>(1)</sup> (mg/kg de materia seca) |
|---------------|--|
| Cobre (Cu)    | 0,5  |
| Mercurio (Hg) | 0,02   |
| Plomo (Pb)    | 1,3  |
| Níquel (Ni)   | 0,75   |
| Zinc (Zn)     | 2,8  |

(6) La lixiviación se mide mediante el ensayo de columna, método CMA 2/II/A.9.1<sup>42</sup>, método de lixiviación dinámica. Se calcula a partir de una aplicación estándar con la altura del material de construcción de 0,7 m y una densidad de 1.550 kg/m<sup>3</sup>.

Los valores máximos de lixiviación se han determinado para un escenario estándar donde la altura de aplicación de los materiales de la construcción es de 0,7 m, medida de forma perpendicular a la superficie terrestre, su densidad de 1.550 kg/m<sup>3</sup> y su infiltración efectiva en la estructura de 300 mm/año.

Para un escenario de aplicación que difiera de los parámetros que determinan la aplicación estándar, se deberá cumplir con los valores límite de inmisión del Anexo 2.3.2.C, indicados en la siguiente tabla:

**Tabla 4.2.4-3. Valores límite de inmisión de metales pesados. Flandes.**

| Elemento      | Valores máximos de inmisión de más de 100 años (mg/m <sup>2</sup> ) <sup>(1)</sup> |
|---------------|--|
| Arsénico (As) | 285  |
| Cadmio (Cd)   | 12   |
| Cromo (Cr)    | 555  |
| Cobre (Cu)    | 255  |
| Mercurio (Hg) | 8,2  |
| Plomo (Pb)    | 609  |
| Níquel (Ni)   | 136  |
| Zinc (Zn)     | 924  |

(1) Cálculo de los valores de inmisión de la emisión, mediante ensayos de columna

<sup>42</sup> [https://sites.vito.be/sites/reflabos/2002/Online%20documenten/CMA\\_2\\_II\\_A.9.1.pdf](https://sites.vito.be/sites/reflabos/2002/Online%20documenten/CMA_2_II_A.9.1.pdf)

Este método, similar al ensayo de columna establecido en Países Bajos, describe la prueba de la columna en la que se recogen 7 fracciones de eluato y en la que luego la lixiviación de los componentes inorgánicos de los materiales granulares se determina como función de la relación entre el líquido y el sólido (valor L/S), a lo largo de una trayectoria que varía de 0,1 a 10 litros por kg de materia seca. El ensayo puede aplicarse a materiales granulares con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción del material)

Para el seguimiento y control de estos materiales, Flandes dispone además de la declaración de materia prima, los certificados de entidades de certificación ambiental COPRO y CERTIPRO que son obligatorios para los áridos reciclados, y voluntarios para los áridos artificiales.

Así mismo, en el año 2014 la Agencia Pública de Residuos (OVAM) publicó el estudio “*Gebruiksmogelijkheden van grondstoffen volgens VLAREMA in of als bouwstof- een stand van zaken*”. En este estudio se ofrece una visión general de las posibles aplicaciones de las materias primas incluidas en el listado del Anexo 2.2 del Reglamento VLAREMA como material de la construcción entre los que se encuentra la escoria de cobre y la escoria de acero evaluando diferentes aspectos: normas y especificaciones, salud ambiental, viabilidad técnica, viabilidad económica y percepción.

Toda la información generada en el estudio se encuentra relacionada, por lo que el resultado final de la guía proporciona un catálogo de hojas por materia prima, aplicación y ejemplos de proyectos piloto. Para continuar completando esta información a futuro, a petición de OVAM se elaboró una propuesta de registro y vigilancia que debería permitir un seguimiento eficaz de las materias primas y su aplicación.

En este estudio se destaca la alta calidad de estas materias primas, examinando cómo han evolucionado las posibilidades de aplicación en los últimos 5 años, para lo que se consultaron diversos estudios y se tuvo en cuenta la situación en los países vecinos.

#### 4.2.5 Italia

La región de Lombardía por medio del Observatorio para la Economía Circular y la Transición Energética se encuentra desarrollando una guía técnica<sup>43</sup> para el **uso de escorias negras de acería (EAF-C)** bajo criterios tanto de subproducto como de fin de condición de residuo.

La guía, en consulta pública hasta el 15 de septiembre de 2020, pretende convertirse en una referencia tanto para los productores que opten por gestionar sus residuos bajo la figura de subproducto como para las autoridades competentes que autoricen su utilización bajo criterios de fin de condición de residuo caso por caso.

- Gestión bajo la figura de subproducto

Dentro de los tratamientos de la escoria negra, la guía considera como práctica industrial habitual las siguientes etapas: 1) transporte de la escoria líquida de los hornos a las zonas de procesamiento, 2) vertido de la escoria en estas zonas, 3) formación de capas superpuestas que solidifican, 4) enfriamiento por agua, 5) trituración primaria y separación de impropios, 6) extracción de la escoria para su procesamiento, 7) procesamiento consistente en una trituración secundaria, selección y desmetalización, 8) clasificación del material granulado por lotes para su posterior análisis de caracterización química y física, y 9) carga del material en los medios de transporte.

---

<sup>43</sup> Regione Lombardia. Osservatorio per l’Economia Circolare e la Transizione Energética. Tavolo scorie di fusione. Scoria nera da forno elettrico EAF-C. 2020.

El material granular obtenido debe poseer marcado CE que demuestre que cumple con las características declaradas. A efectos de obtener el marcado CE, el fabricante debe elaborar un Sistema de Control de Producción en Fábrica (CPF) que identifique y corrija rápidamente desviaciones y que abarque todos los procesos desde la recepción de las materias primas hasta la producción final del material.

Por tanto, la escoria negra EAF-C podrá gestionarse como subproducto si: a) se demuestra que va a ser utilizada ulteriormente mediante contratos entre el productor y los usuarios finales, o cualquier intermediario, que incluyan las características técnicas del material y las condiciones de uso o, en ausencia de contrato, mediante documentación técnica que acredite estas características y condiciones; b) los tratamientos recibidos se incluyen entre los listados con anterioridad; c) se produce como parte integrante del proceso de producción del acero; y d) se demuestre el cumplimiento de los requisitos técnicos, mediante el marcado CE, y ambientales y de la salud humana, cumpliendo con los valores límite exigidos en el documento.

- Gestión como residuo valorizado mediante criterios de fin de condición de residuo

La guía contempla la posibilidad de que la escoria producida, aunque tenga las características potenciales para ser subproducto, no se gestione como tal por acuerdos con empresas externas, por falta de personal o instalaciones adecuadas para su gestión o por una cantidad de generación insuficiente que haga económicamente inviable su tratamiento en las instalaciones del productor. En estos casos la escoria es un residuo de producción hasta su desmetalización, momento a partir del cual se considera residuo.

Estos residuos pueden ser valorizados en instalaciones autorizadas para ello, realizando tratamientos tales como la trituración, molienda y cribado de la escoria, la desmetalización si es necesario, y en algunos casos operaciones de estabilización y/o maduración, así como otras operaciones innovadoras debidamente planificadas y descritas en la autorización correspondiente.

Por tanto, la escoria negra EAF-C puede perder su condición de residuo dado que a) se utiliza para finalidades específicas, b) existe un mercado consolidado durante décadas en Italia, c) demuestre cumplir los requisitos técnicos, mediante el marcado CE y, d) demuestre el cumplimiento de los requisitos ambientales y de la salud humana, cumpliendo con los valores límite exigidos en el documento.

Las instalaciones autorizadas que traten las escorias deben incluir un sistema de gestión que incluya la caracterización del material y el cumplimiento de los requisitos técnicos y ambientales, la procedencia de la escoria, los usos del material recuperado, el cumplimiento de la legislación ambiental y de los requisitos impuestos en la debida autorización, la revisión y mejora del sistema de gestión y la formación del personal.

Los usos establecidos en la guía comprenden en general aquellas aplicaciones en las que el material se utilice como árido, siendo los usos más comunes la construcción de carreteras y obras de ingeniería civil, la fabricación de suelo-cemento, como árido para hormigón o árido para mezclas bituminosas.

La guía propone como criterio ambiental el ensayo de la muestra del material mediante la norma UNI-EN 1744-3:2003<sup>44</sup>, adecuada para tamaños de muestra comprendidos entre 16-32 mm, ya que la norma UNI-EN 12457-2:2003<sup>45</sup>, no representa la realidad de la escoria negra de acero durante su uso como material de la construcción al requerir tamaños de muestra inferiores a 4mm, por lo que para su ensayo, la muestra debe ser molida generando gran cantidad de fracción fina que altera significativamente el comportamiento de lixiviación. Con objeto de evitar esa variabilidad en los resultados, Italia ha aprobado recientemente una norma UNI/PdR 94:2020<sup>46</sup> para la preparación de la muestra de escoria negra que se someterá a la prueba de lixiviación según la norma UNI EN 12457-2.

Así mismo, se aconseja de forma complementaria realizar otro tipo de pruebas, como el ensayo de ecotoxicidad, con objeto de evitar casos en los que la superación del valor límite de un único parámetro por lixiviación suponga el envío a vertedero del material, a pesar de que su impacto ambiental real sea bajo.

Por ello, la guía propone definir dos grupos de parámetros según sus características de toxicidad, aquellos que se consideran relevantes en la escoria negra y que obligatoriamente deben cumplir con los límites de lixiviación impuestos (Grupo A), y otras sustancias (Grupo B) que aun superando el límite impuesto es posible demostrar su idoneidad mediante ensayos de ecotoxicidad.

A continuación, se presentan los valores límite propuestos en la guía italiana:

**Tabla 4.2.5-1. Parámetros y valores límite de lixiviación de la escoria negra. Italia.**

| Grupo | Parámetro        | Valor límite (mg/l).<br>UNE-EN 1744-3. |
|-------|------------------|--|
| A     | Arsénico (As)    | 0,05                                   |
|       | Berilio (Be)     | 0,01                                   |
|       | Cadmio (Cd)      | 0,005                                  |
|       | Cobalto (Co)     | 0,25                                   |
|       | Cromo total (Cr) | 0,05                                   |
|       | Mercurio (Hg)    | 0,001                                  |
|       | Níquel (Ni)      | 0,01                                   |
|       | Plomo (Pb)       | 0,05                                   |
| B     | Bario (Ba)       | 1                                      |
|       | Fluoruros        | 1,5                                    |
|       | Molibdeno (Mo)   | 0,15                                   |

<sup>44</sup> UNE-EN 1744-:2003. *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 3: Preparación de eluatos por lixiviación de áridos.*

<sup>45</sup> UNE-EN 12457-2:2003. *Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos.*

<sup>46</sup> *Scoria nera da forno da arco elettrico (EAF) - Metodo per la preparazione del campione da sottoporre a prova di lisciviazione secondo la UNI EN 12457-2.*

| Grupo | Parámetro    | Valor límite (mg/l).<br>UNE-EN 1744-3. |
|-------|--------------|--|
|       | Cobre (Cu)   | 0,05                                   |
|       | Selenio (Se) | 0,01                                   |
|       | Vanadio (V)  | 0,25                                   |
|       | Zinc (Zn)    | 3                                      |
|       | COD          | 30                                     |
|       | pH           | 9-13                                   |

#### 4.2.6 Suiza

Suiza cuenta con varias guías de aplicación para distintos flujos de residuos con objeto de hacer cumplir con la Ordenanza de eliminación de residuos (OLED) de 4 de diciembre de 2015. Entre las guías elaboradas se encuentra la guía de *Valorisation des laiters d'acierie électrique (LAFE)* de 2018.

La guía establece los requisitos ambientales para el uso de **las escorias de horno de arco eléctrico procedentes de la fabricación de aceros no aleados o de baja aleación (escoria negra)** en la industria de la construcción tras un tratamiento adecuado (trituration, cribado y separación de metales), tanto en aplicaciones ligadas como no ligadas. Los cantones<sup>47</sup> pueden autorizar la utilización de la escoria tratada caso por caso o pueden exigir de manera general el cumplimiento de las condiciones de uso de esta guía.

Como árido no ligado, y con objeto de proteger las aguas superficiales y subterráneas, la escoria tratada debe utilizarse bajo las siguientes condiciones:

- Bajo capa impermeable (betún u hormigón).
- No podrá utilizarse en zonas de protección de aguas subterráneas ni en contacto directo o a menos de 2 m de éstas, distancia que puede ser menor si con permiso de la autoridad competente se demuestra ausencia de riesgo.
- No está permitido su uso en capas de drenaje o trabajos de infiltración de aguas superficiales, así como en la construcción de diques o pistas de graveras, marismas o canteras.
- Si la escoria tratada se utiliza en capas intermedias, debe separarse de otros materiales de construcción, por ejemplo, con un material textil. El espesor de capa, en cualquier caso, no puede superar los 2 m.

El único requisito para aquellas aplicaciones ligadas, como fabricación de hormigón o mezcla bituminosa, es relativo al origen de las escorias, pudiendo utilizar únicamente escorias negras.

Con objeto de garantizar la calidad del material fabricado debe analizarse mediante un laboratorio independiente, al menos semestralmente, una cantidad representativa del mismo. Las muestras deben

<sup>47</sup> Ente político y administrativo sobre el que se construye el Estado-nación. Suiza se compone de 26 cantones.



prepararse y realizarse conforme a la guía de aplicación “*Méthodes d’analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués (OFEV 2017)*”, analizándose al menos:

- Contenido total: Plomo, zinc, cromo total, cromo (VI), cobre, níquel.
- Contenido lixiviado: Plomo, zinc, cromo total, cromo (VI), níquel, flúor, pH, sales solubles.

La guía describe el método de ensayo para determinar el contenido lixiviado, consistente en un ensayo de columna dinámico para relaciones L/S 0,25, 3 y 6 L/kg. Los resultados obtenidos se deben comparar con los valores límite indicados en la Ordenanza de eliminación de residuos (OLED), correspondientes a los valores límite de admisión en vertederos de residuos inertes:

**Tabla 4.2.6-1. Valores límite de contenido de metales pesados. Suiza.**

| Parámetros  | Lixiviación (mg/kg) |
|-------------|---------------------|
| Plomo (Pb)  | 1.000               |
| Cadmio (Cd) | 10                  |
| Cromo       | 4.000               |
| Cobre (Cu)  | 3.000               |
| Níquel (Ni) | 500                 |
| Zinc (Zn)   | 6.000               |

**Tabla 4.2.6-2. Valores límite de lixiviación de metales pesados. Suiza.**

| Parámetros    | Lixiviación (mg/l) |
|---------------|--------------------|
| Aluminio (Al) | 10                 |
| Arsénico (As) | 0,1                |
| Bario (Ba)    | 5                  |
| Plomo (Pb)    | 1                  |
| Cadmio (Cd)   | 0,1                |
| Cromo (III)   | 2                  |
| Cobre (Cu)    | 0,5                |
| Níquel (Ni)   | 2                  |
| Mercurio      | 0,01               |
| Zinc (Zn)     | 10                 |
| Estaño (Sn)   | 2                  |

#### 4.2.7 Reino Unido

Reino Unido ha desarrollado un protocolo de calidad para el uso de escorias procedentes de la industria del acero, *Aggregate from waste 73teel slag: quality protocol*<sup>48</sup>, publicado en abril de 2015 y cuya última actualización data de mayo de 2016. Este protocolo es efectivo en Inglaterra, Gales e Irlanda del Norte.

El Protocolo de Calidad establece los criterios fin de condición de residuo para la producción y utilización de áridos procedentes de escorias derivadas de la fabricación de acero, incluyendo la escoria de horno de arco eléctrico clasificada con los códigos LER “10 02 01 Escorias de altos hornos y de acería” o “10 02 02 Escorias no tratadas”. Es decir, **el protocolo considera las escorias negras de acería, pero no las escorias blancas.**

El árido producido a partir de escorias de acería se considerará totalmente recuperado y no estará sujeto a la normativa de residuos cuando se demuestre que:

- Se utilicen solo las escorias de acero permitidas;
- Se utilice para fabricar solo los productos permitidos;
- Cumpla con los estándares europeos, especificaciones y control de calidad para el producto que se está fabricando sin la necesidad de ningún otro tratamiento antes de su uso.
- Disponga de un manual de control de producción de fábrica (FPC). Control interno continuo efectuado por el mismo fabricante, que documenta sistemáticamente en forma de medidas y de procedimientos escritos los elementos del sistema y las medidas adoptadas para el control de la producción.
- Disponga del marcado CE y cumpla los requerimientos del Reglamento Europeo de los Productos de la Construcción (UE) nº 305/2011.
- Sea transportado, almacenado, manejado y procesado siguiendo las directrices de buenas prácticas.
- Se faciliten al cliente los documentos de entrega que confirmen que el producto cumple con lo establecido en el protocolo.

Los usos establecidos en el protocolo comprenden aplicaciones ligadas, semi-ligadas y no ligadas en obras de construcción e ingeniería civil. Concretamente, en el caso de la escoria de acero:

- Aplicaciones no ligadas: Árido para sub-bases, cobertura, relleno, cama de tubería.
- Aplicaciones semi-ligadas: Árido para el tratamiento de superficies.
- Aplicaciones ligadas: Árido para la fabricación de asfalto y hormigón, árido en mezclas con conglomerante hidráulico.

Los requisitos técnicos serán los establecidos en los estándares y especificaciones de cada producto. Determinarán la forma, el tamaño, envejecimiento u otro proceso que sea necesario llevar a cabo. En

---

<sup>48</sup><https://www.gov.uk/government/publications/aggregate-from-waste-steel-slag-quality-protocol/aggregate-from-waste-steel-slag-quality-protocol#uses>

cuanto a los requisitos específicos se indica que la cal presente en la escoria no envejecida puede provocar una expansión del árido y hacerlo inadecuado para ciertos usos. Por ello, se deberá controlar el tiempo de envejecimiento en línea con los requerimientos de los ensayos de expansión presentes en la norma BS EN 1744-1.

El protocolo exige que se mantengan registros, por un periodo mínimo de dos años, de los residuos de entrada aceptados y rechazados, de los ensayos y ajustes para cumplir las especificaciones y del registro de salida que incluya descripción del producto, nombre del productor, fecha de envío, identificación del lote, cliente, descripción de la actividad del cliente, declaración de conformidad y los ensayos y detalles del control de producción en fábrica si son solicitados por el cliente.

En cuanto al control de producción en fábrica (CPF) se debe contar con un sistema que cumpla con el protocolo y las normas que sean de aplicación al tipo de producto fabricado, en función de su uso.

El material fabricado volverá a considerarse residuo si en cualquier momento existe la intención de deshacerse del mismo o se almacena indefinidamente con pocas perspectivas de ser utilizado, tanto en las instalaciones del productor como en cualquier otra.

En cuanto al establecimiento de valores límite, resultados de evaluaciones de riesgo realizados concluyeron que no existe riesgo para las aguas subterráneas y superficiales ni para la salud humana por lo que el protocolo de calidad no incluye el establecimiento de valores límite para ninguna sustancia. Los usos ligados e hidráulicamente ligados de las escorias no se incluyeron en esta evaluación porque se consideró que la escoria queda totalmente retenida dentro del material y, por tanto, presenta un mínimo riesgo al medioambiente.

#### **4.2.8 Conclusiones**

En Europa se han identificado diferentes EEMM que han desarrollado normativa que regula o guías que abordan el uso de áridos derivados de residuos para ser usados como materiales de construcción, entre los que se encuentran determinados tipos de escorias.

La mayoría de EEMM regulan o abordan el uso de la escoria negra, como es el caso de Francia, Países Bajos, Alemania, Italia, Suiza y Reino Unido. Además, Alemania y Países Bajos regulan también el uso de la escoria de cobre. Flandes por su parte regula el uso de cualquier tipo de escoria de fundición.

Países Bajos, Flandes (Bélgica) y Alemania, regulan de forma general el uso de los materiales de construcción, entre los que se contemplan los residuos minerales como los áridos reciclados o artificiales; mientras que el resto regula de manera específica el empleo de estos residuos como material de la construcción a través de guías (Francia, Italia y Suiza) o a través de protocolos de calidad como Reino Unido.

De manera genérica se puede considerar que, al igual que en las normas de valorización de escorias en España, los distintos EEMM han definido escenarios de uso que contemplan tanto el uso como árido en aplicaciones ligadas y no ligadas, como materia prima para la fabricación de productos de construcción, estableciendo condiciones de uso (valores límite, empleo bajo determinadas condiciones de impermeabilización, protección de las zonas de agua, etc.) que son más estrictas en el caso de las aplicaciones

no ligadas. De manera particular, en el caso de Francia, Alemania y Suiza, al igual que en las normas de valorización de País Vasco y Cataluña, en las aplicaciones no ligadas se requiere el empleo de la escoria bajo una capa que garantice cierta capacidad de impermeabilización y, en caso de que no sea posible dicha capa, se exigen condiciones de uso más restrictivas que abarcan desde la prohibición de su uso en zonas de especial protección hasta su utilización con medidas de protección específicas.

En el Anexo VIII se puede consultar un resumen de los requisitos regulados en la normativa analizada en los distintos EEMM: norma aplicable, régimen jurídico de la escoria, escenarios y descripción de las aplicaciones permitidas, condicionantes y restricciones de uso, control de calidad y frecuencia de los ensayos y normas de producto.

Con objeto de garantizar la calidad ambiental y la salud de las personas, la mayoría de los países exigen cumplir con ciertos valores límite de lixiviación de compuestos inorgánicos en las escorias, excepto Italia que limita también compuestos orgánicos (COD). Países Bajos requiere asimismo valores límite de composición de compuestos orgánicos y Flandes de compuestos orgánicos e inorgánicos. Reino Unido no especifica valores límite.

En cuanto a estos valores cabe mencionar las siguientes singularidades:

- **Francia:** Los valores límite se encuentran asociados a tres tipos de uso (bajo estructura revestida, bajo estructura cubierta y sin restricciones de espesor), siendo más estrictos en aquellos usos con menos nivel de protección. Las pruebas de lixiviación deben realizarse conforme a la norma NF EN 12457-4<sup>49</sup>. Si se supera algún parámetro, se recoge la posibilidad de realizar una prueba de percolación adicional o incluso un estudio específico que justifique su uso seguro.
- **Países Bajos:** Los valores límite de lixiviación se encuentran asociados a tres tipos de material, conformado, no conformado y no conformado con medidas de protección, siendo más estrictos en aquellos materiales no conformados. Las pruebas de lixiviación deben realizarse conforme a la norma NEN 7373 (ensayo de columna relación L/S de 10 L/kg) o NEN 7383 (ensayo de columna simplificado), pudiendo recurrir a la norma NEN 7371 (ensayo de disponibilidad). La inclusión del material como material conformado o no, conlleva la realización de una serie de ensayos de tamaño y resistencia, además del cumplimiento de los valores límite de lixiviación y composición.
- **Alemania:** Los valores límite se encuentran asociados a dos clases de material, en función del contenido de ciertos parámetros en el eluato de las escorias y que se establecen en la norma, que limita las posibles aplicaciones de uso y los condicionantes a la hora de su empleo. Las pruebas de lixiviación deben realizarse conforme a la norma alemana DIN 19528 o DIN 19529, ensayos de percolación en columna (relación L/S de 2 L/kg).

---

<sup>49</sup> UNE-EN 12457-4:2003. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 L/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño).

- **Flandes:** Presenta unos valores límite de lixiviación únicos para cualquier material de construcción. Las pruebas de lixiviación deben realizarse mediante el ensayo de percolación en columna según el método CMA 2/II/A.9.1 (relación L/S de 10 L/kg), método de lixiviación dinámica.
- **Italia:** Los valores límite de lixiviación se dividen en dos grupos de parámetros, aquellos que se consideran relevantes en la escoria y que obligatoriamente deben cumplir con los límites de lixiviación impuestos, y otras sustancias que aun superando el límite impuesto es posible demostrar su idoneidad mediante ensayos de ecotoxicidad. Las pruebas de lixiviación deben realizarse conforme a la norma UNI-EN 1744-3:2003. No obstante, se ha aprobado recientemente la norma UNI/PdR 94:2020 para la preparación de la muestra de escoria negra que se someterá posteriormente a la prueba de lixiviación normalizada según la norma UNI EN 12457-2.
- **Suiza:** Las pruebas de lixiviación deben realizarse conforme a un procedimiento propio basado en ensayos de percolación en columna (relación L/S de 0,5, 3 y 6 L/kg). Los resultados, teniendo en cuenta los mayores contenidos, no deben superar los valores límite indicados en la Ordenanza de eliminación de residuos, correspondientes a los valores límite de admisión en vertederos de residuos inertes.

Según lo anteriormente expuesto, en relación con el tipo de ensayos de lixiviación, los países que regulan el uso de las escorias como residuo, como Francia, requieren que las pruebas de lixiviación se realicen conforme a la norma UNE 12457, mientras que países que regulan de forma general el empleo de materiales de la construcción, entre los que se incluyen materiales residuales, como Países Bajos, Alemania y Flandes, establecen ensayos de lixiviación en columna.

En el Anexo VI se pueden consultar los valores límite de lixiviación establecidos en la normativa analizada en cada uno de los EEMM contemplados, junto con los tipos de ensayo de lixiviación requeridos. Como se puede ver en dicho anexo, excepto en el caso de Alemania, Italia y Suiza que requieren ensayos en columna con una relación L/S < 10 L/kg, los valores límite establecidos tanto para ensayos de volteo como para ensayos de columna con una relación L/S de 10 L/kg, se encuentran en el mismo orden de magnitud. Si bien cabe señalar, que **los valores límite obtenidos mediante ensayos diferentes no son directamente comparables, por lo que esta comparación es meramente orientativa.**

Finalmente, la mayoría de los países exige establecer un sistema de gestión de calidad que permita comprobar el cumplimiento de los requisitos técnicos y ambientales establecidos. Los materiales de construcción producidos pueden ser reconocidos por diferentes distintivos de calidad, como el marcado CE, obligatorio para los productos de construcción, pero también por certificados reconocidos a nivel internacional como los certificados NL-BSB y KOMO holandeses o el certificado COPRO belga.

### 4.3 ESTUDIO DEL JOINT RESEARCH CENTRE (JRC)

En el año 2014 el Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea publicó el documento *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*, realizado por DHI

(Dinamarca) en cooperación con ECN (Energy research Centre of the Netherlands) y Hans van der Sloot Consultancy.

Este estudio describe aspectos metodológicos para establecer valores límite de contaminantes para los áridos derivados de residuos en el marco de un posible desarrollo de criterios de fin de la condición de residuo (FcR) con el objeto de utilizar dichos áridos en una amplia variedad de proyectos de la construcción. Más específicamente, el estudio se centra en los áridos que están sujetos a lixiviación y/o liberación por desgaste.

No abarca otros aspectos relativos a la posible contaminación derivada del uso de estos áridos, como la emisión de sustancias volátiles o su posible radioactividad, ni otro tipo de aplicaciones que no sea su utilización en la construcción.

Asimismo, se excluyen del estudio otras condiciones de FcR, como el uso habitual en finalidades específicas, las condiciones de mercado y los requisitos técnicos o normas jurídicas de aplicación. En particular, los requisitos técnicos sobre geometría, durabilidad y propiedades físicas de los áridos derivados de residuos no se abordan en el citado documento, pero se consideran sustanciales al considerar los posibles criterios de FcR para los áridos procedentes de residuos.

El estudio diferencia los áridos procedentes de procesos industriales, de los áridos reciclados producidos a partir del tratamiento de materiales usados previamente en la construcción. Entre **los áridos incluidos en el estudio se encuentran las escorias de horno de arco eléctrico (EAF), es decir la escoria negra**. El documento cita también otro tipo de escorias, como las de alto horno (BF/BOF), si bien estas no se encuentran incluidas en el alcance del presente estudio.

La metodología propuesta para el establecimiento de valores límite como parte de los posibles criterios FcR para proteger a la salud humana y al medioambiente del uso de áridos derivados de residuos, es independiente del árido en cuestión y se propone seguir una evaluación de riesgos basada en un modelo conceptual que considera una cadena de acontecimientos que incluye la fuente potencial de contaminación (es decir, el árido), el receptor, así como las posibles vías de migración entre ellos. El receptor puede ser el suelo, las aguas subterráneas o las aguas superficiales que se encuentran debajo o aguas abajo del árido, y los principales criterios de calidad que deben cumplirse en el punto de cumplimiento deben ser criterios de calidad del agua, que son aceptables en todos los Estados miembros de la UE.

El establecimiento de valores límite (a diferencia de una evaluación de riesgo única de un tipo particular de árido derivado de residuos) tiene la ventaja de comprobar en cualquier momento si un determinado flujo de residuos bajo el régimen de FcR cumple con, por ejemplo, criterios de lixiviación, y permite el establecimiento de ensayos rutinarios a nivel de control de fábrica.

Como aspectos a destacar del estudio respecto al establecimiento de valores límite de contaminantes para áridos derivados de residuos en general y para las escorias de horno de arco eléctrico (EAF) en particular, cabe señalar los siguientes:

- En general, de cara a evaluar la liberación o potencial liberación de sustancias desde los áridos a las aguas subterráneas y superficiales y al suelo, es preferible realizar ensayos de lixiviación más que

analizar la composición (contenido total) de los áridos, dado que las propiedades de lixiviación de un árido están directamente relacionadas con el riesgo de dichos impactos.

Aunque el contenido total no sea un indicador idóneo del potencial impacto en el medioambiente, los resultados de estos análisis pueden ser utilizados en la evaluación de los posibles efectos para la salud humana causados por contacto, ingestión o inhalación (de polvo) de áridos, además de ser necesario para aquellas sustancias que no disponen de ensayos de lixiviación estandarizados, como es el caso de las sustancias orgánicas.

Se ha demostrado que la lixiviación de sustancias inorgánicas puede considerarse como una función de la relación líquido-sólido (L/S) y como una función del pH en condiciones de equilibrio. Para un flujo constante, para flujos que permanezcan a medio o largo plazo o en condiciones de percolación (flujo lento), la L/S es proporcional al tiempo (S = la cantidad de material en cuestión permanecerá constante, y L, la cantidad de agua que ha estado en contacto con el material, corresponderá, en cualquier momento, a la cantidad de agua acumulada que se ha filtrado a través del material), y a efectos de modelización la escala L/S puede por lo tanto ser convertida a una escala de tiempo para un escenario físico determinado.

- Por otra parte, salvo excepciones (COD y fenoles), los criterios de aceptación de residuos en vertedero basados en la lixiviación solo incluyen sustancias inorgánicas. La razón principal de esto es que, si bien existen ensayos de lixiviación estandarizados y bien probados para sustancias inorgánicas en la UE, los ensayos de lixiviación para sustancias orgánicas están mucho menos desarrollados y, en la actualidad, la experiencia con ensayos de lixiviación para sustancias orgánicas probablemente no sea suficiente para que estos se apliquen en general a los sistemas regulatorios.

En consecuencia, el contenido total de sustancias orgánicas de interés debería emplearse como base para la evaluación, situación que deberá revisarse cuando se disponga de métodos y datos adecuados.

Por lo tanto, parece apropiado y necesario establecer valores límite de lixiviación para las sustancias de que podrían generar un potencial impacto ambiental y valores límite de contenido total para las sustancias significativas para la salud humana como parte de los criterios de FcR.

- Muchos áridos derivados de residuos solo contendrán trazas de sustancias orgánicas, y muchas de estas, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y los bifenilos policlorados (PCB) son relativamente inmóviles en el suelo y las aguas subterráneas. Sin embargo, el transporte puede verse facilitado por la presencia de carbono orgánico disuelto (COD) en el lixiviado de los áridos. Dado que el COD también puede mejorar la movilidad de sustancias inorgánicas (por ejemplo, Cu), existen motivos para establecer límites a la liberación de COD de los áridos al evaluar los criterios de FcR.

No obstante, cabe señalar que, según comunicaciones recientes con el Gobierno Vasco o la guía francesa de valorización de escorias siderúrgicas, las escorias proceden de un proceso térmico en el que se produce la combustión completa de los compuestos orgánicos, por lo que carecen de este tipo de sustancias. Solo Italia impone cierto límite de COD en las escorias negras.

- Aunque no se recomienda adoptar únicamente los valores límite de lixiviación de la UE para la aceptación de residuos en vertederos de residuos inertes, el estudio realiza una comparación preliminar de los datos de lixiviación disponibles de las escorias de horno de arco eléctrico con dichos valores límite, con el fin de identificar las sustancias que pueden ser potencialmente problemáticas en relación con establecer el FcR.

Como resultado de dicha comparación, se señala que el **bario, el cromo, el molibdeno y el vanadio pueden ser parámetros problemáticos en las escorias negras de horno de arco eléctrico**, por lo que la lixiviación de dichas sustancias debe incluirse sin duda alguna en la evaluación que, sin embargo, debe abarcar un espectro mucho más amplio de sustancias que las identificadas en el estudio como potencialmente críticas.

- Para el desarrollo de valores límite de lixiviación en el contexto del establecimiento de criterios FcR para áridos a nivel de la UE, teóricamente podría ser útil aplicar los criterios de calidad de aguas subterráneas o superficiales en toda la UE como criterios de calidad principales, aunque éstos no existen hasta la fecha. En su lugar, se podrían utilizar los criterios de calidad de agua potable de la UE (Directiva 98/83/CE<sup>50</sup>), teniendo en cuenta que su objetivo principal es proteger a los consumidores de agua y no al ecosistema, que puede ser más vulnerable a ciertas sustancias que las personas. Para ello, habría que determinar en primer lugar qué sustancias deberían limitarse en el agua y después cuáles de esas sustancias están presentes o pueden estar presentes en los lixiviados de los áridos procedentes de residuos. Estas últimas serían las sustancias para las que desarrollar valores límite de lixiviación.
- Para los áridos alcalinos, tales como las escorias de acero, será importante conocer cómo cambian las propiedades del lixiviado cuando los áridos son carbonatados en contacto con el aire/CO<sub>2</sub> y lo rápido que esto sucede. La carbonatación comenzará en la superficie de los materiales alcalinos y (en la mayoría de los casos lentamente) avanzará hacia el interior de estos. La carbonatación – en la que los hidróxidos se transforman en carbonatos a través de la captura de CO<sub>2</sub> – cambiará el pH en contacto con el agua desde el pH original de, por ejemplo, 11 a 12 a aproximadamente 7,5 a 9. Esto provocará un cambio en la solubilidad y lixivabilidad de varios elementos traza/contaminantes, pudiendo incrementar la solubilidad y liberación de unos, y disminuir la de otros. Por tanto, es importante conocer la potencial liberación de sustancias contaminantes en función del pH.

También es importante determinar si un árido se encuentra o no en estado reducido (no termodinámicamente estable en condiciones ambientales/atmosféricas). La reducción de las condiciones de la escoria (u otros áridos) tiene un efecto beneficioso sobre la lixiviación de algunos contaminantes. Por ejemplo, la lixivabilidad del Cr es reducida en cementos mezclados con escoria reductora; el cromato (Cr (VI)) presente en los cementos Portland se reduce a Cr (III), menos soluble

---

<sup>50</sup> Directiva 98/83/CE del Consejo, de 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.



al mezclarse. Las condiciones de reducción pueden, por ejemplo, identificarse a partir del aumento de la lixiviación de Fe y Mn a pH neutro.

Cuando el material reducido se oxida, por ejemplo, debido a la exposición al oxígeno atmosférico en presencia de agua y posiblemente durante un período de tiempo más largo, las especies reducidas menos solubles pueden cambiar a sus estados más oxidados y volverse más solubles. Esto podría ocurrir, por ejemplo, al final de la vida útil, si el material se tritura y se recicla o se desecha en condiciones oxidantes en contacto con el aire atmosférico. En el caso de los áridos que contienen sulfuros, la oxidación puede dar lugar a la acidificación, si éste no tiene suficiente capacidad de neutralización del ácido (ANC). La utilización de áridos con propiedades reductoras también puede dar lugar a problemas ambientales como el agotamiento del oxígeno en ciertos tipos de aplicaciones.

- Los áridos bajo la figura de FcR pueden ser utilizados en aplicaciones ligadas y no ligadas. Cuando se encuentran ligados en materiales cementosos, la presencia de los áridos no suele provocar un cambio significativo en el comportamiento de lixiviación del material conformado. Sólo pueden influir en el comportamiento de lixiviación de los materiales de pequeño tamaño en un ensayo de dependencia del pH. Incluso concentraciones elevadas de metales pueden no ser detectadas en los lixiviados cuando se ensayan bajo condiciones reales de utilización.
- En el establecimiento de los criterios de FcR deberán tenerse en cuenta las condiciones de los materiales al final de su vida útil, ya que un árido bajo la figura de FcR puede permanecer en el lugar de aplicación después de que su vida útil primaria haya expirado, sin volver a considerarse un residuo, o puede deteriorarse y desintegrarse físicamente durante etapas posteriores de su vida útil. En estos casos, se deberían evaluar escenarios basados en tamaños de partícula reducidos y exposiciones a largo plazo (incluyendo oxidación y neutralización del pH mediante la carbonatación).
- Basándose en la evidencia experimental, parece correcto asumir que un material ligado lixiviará menos que el mismo material triturado o molido. Puesto que los materiales ligados pueden acabar eventualmente desagregados al final de su vida útil, los áridos utilizados en aplicaciones ligadas deberían ser ensayados también en estado no ligado, teniendo en cuenta los potenciales efectos del envejecimiento de los áridos, la carbonatación y los cambios en el pH y el potencial redox. Esto implica que se pueden utilizar los mismos escenarios para evaluar la liberación de sustancias en materiales ligados y no ligados.
- La máxima liberación de algunas sustancias desde un árido por unidad de tiempo en una aplicación no ligada se puede producir durante la parte inicial del período de lixiviación, es decir, a relaciones líquido-sólido (L/S) más bajas. En este caso, las máximas concentraciones en el lixiviado se observarían durante este período. Sin embargo, otras sustancias, en particular aquellas cuya liberación está controlada por la solubilidad, pueden mostrar niveles constantes o en aumento en un intervalo de tiempo prolongado o a relaciones L/S más amplias. Es por ello por lo que, para el estudio de los valores límite, se debería contemplar un escenario que represente una aplicación no ligada de pequeñas partículas expuestas a condiciones ambientales críticas (en términos de percolación de la precipitación infiltrada), durante un período de tiempo elevado (relación L/S alta), con grosores de

la capa de aplicación relativamente altos (ya que el flujo de sustancias liberadas suele aumentar o es prolongado con la altura de la aplicación). En consecuencia, para un escenario, término fuente, se deberá valorar tanto la cantidad de lixiviado como la concentración de las sustancias presentes en este.

- Además del pH, que se considera la principal variable química que controla la lixivabilidad, las siguientes propiedades químicas también influyen en la lixiviación de los áridos:
  - potencial redox y la complejación por sustancias inorgánicas y orgánicas,
  - tamaño de partícula o distribución del tamaño de partícula,
  - porosidad.
- El conjunto de herramientas propuesto para la evaluación de las propiedades de lixiviación de los áridos (basados en las orientaciones de los Comités de normalización europeos para el muestreo, tratamiento previo y análisis químicos de los áridos), incluyen los siguientes ensayos:
  - Ensayos de dependencia del pH (UNE-EN 14429<sup>51</sup> y UNE-EN 14997:2015<sup>52</sup>)
  - Ensayos de percolación (UNE-EN 14405:2017<sup>53</sup> y CEN / TC 351)
  - Ensayos de lixiviación por lotes (UNE-EN 12457-1, 2 o 3)

Todos los ensayos anteriores se realizan en material granular o de tamaño reducido de acuerdo con los escenarios de FcR más críticos a evaluar. También se describen brevemente dos métodos para determinar la liberación relacionada con la superficie / difusión en materiales conformados<sup>54</sup>:

- Prueba de lixiviación de tanques para materiales monolíticos (UNE-EN 15863:2015<sup>55</sup> y DSLT (Dynamic Surface Leaching Test) CEN / TC 351)
- Prueba de lixiviación en tanques para materiales granulares compactados (opción en DSLT, CEN / TC 351)

Debido a la gran diversidad de ensayos disponibles y a la relevancia de la lixiviación para estimar la posible afección al medio ambiente debido al uso de residuos como material de la construcción, en el Anexo IV del presente estudio se ha recopilado información sobre los principales factores que afectan a la lixiviación y los tipos de ensayos disponibles para evaluar las propiedades de lixiviación de los áridos.

---

<sup>51</sup> Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento durante la lixiviación. Influencia del pH en la lixiviación con adición inicial de ácido/base.

<sup>52</sup> Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento durante la lixiviación. Influencia del pH en la lixiviación con control continuo de pH.

<sup>53</sup> Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento en la lixiviación. Ensayo de percolación de flujo ascendente (bajo condiciones específicas).

<sup>54</sup> Estos últimos ensayos solo pueden considerarse en relación con el FcR cuando un material es muy duradero, es decir, aquel que conserva su integridad física incluso en condiciones de exposición extremas

<sup>55</sup> Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento durante la lixiviación para la caracterización básica. Ensayo de lixiviación dinámico de monolitos con renovación periódica del lixivante en condiciones fijas.

- A la hora de fijar los valores límite de lixiviación se pueden seguir dos estrategias:
  - Uso libre, sin restricciones, de los áridos que cumplan los criterios de FcR, basado por tanto en las condiciones más desfavorables.
  - Uso con restricciones, permitiendo, por tanto, criterios de FcR menos restrictivos.

El uso de áridos reciclados sin restricción conllevaría a la obtención de valores límite muy estrictos, muy inferiores a los valores límite de admisión en vertederos de residuos inertes, que impedirían probablemente su cumplimiento.

- Es importante indicar que un valor límite de lixiviación está estrechamente asociado con el método de ensayo o las condiciones específicas de éste. Además de valores límite de lixiviación y de contenido total, entre las condiciones que se pueden fijar como restricciones al uso de los áridos derivados de residuos, se citan las siguientes:
  - utilización para aplicaciones concretas,
  - retirada del material al final de su vida útil,
  - fijación de distancias mínimas al nivel de agua subterránea y a las aguas superficiales,
  - limitación del espesor y superficie de aplicación,
  - limitación de la tasa de infiltración permitida.

#### 4.4 ESTUDIO DE LA COMISIÓN EUROPEA

El documento *Study to Assess Member States (MS) Practices on By-Product (BP) and End-of-Waste (EoW)*, de abril de 2020 de la Comisión Europea tiene por objeto proporcionar información sobre la aplicación de las disposiciones de subproducto y fin de la condición de residuo en los distintos Estados Miembros en aras de establecer un mercado interno común y en igualdad de condiciones para estos materiales.

Para ello, el documento analiza la legislación y la normativa general de aplicación relativa a los residuos existente en los diferentes EEMM según aportaciones de los propios países. Así mismo, realiza un análisis detallado del estado de determinados flujos de residuos y de determinados procedimientos ejecutados en éstos. Por último, dicta una serie de recomendaciones que deben tenerse en cuenta para enmarcar las futuras leyes y regímenes de aplicación de subproducto y fin de condición de residuo.

Entre los flujos concretos analizados se encuentra el "*Case 1: Metal bearing slags used as raw material under an EoW status*" que incluye, entre otras, las escorias ferrosas (negras y blancas), no ferrosas (escoria de cobre) y escorias de ferroaleaciones, entre las podría incluirse las escorias de SiMn.

Tal y como indica el documento, las escorias y su clasificación como residuo, producto o subproducto ha sido objeto de debate a lo largo del tiempo. En la *Comunicación Interpretativa sobre residuos y subproductos COM (2007) 59 final, de 21 de febrero de 2007*, la Comisión Europea consideró la escoria de alto horno (BF) fuera de la definición de residuo, mientras que el documento *Draft Guidelines on the interpretation of key provisions of Directive 2008/98/CE on waste. 2012*, proporciona ejemplos y aclaraciones de cuando este tipo

de escoria puede considerarse subproducto. Además, esta consideración varía de unos Estados miembro a otros, lo que dificulta considerablemente los envíos transfronterizos en Europa.

Una solución podría consistir en una armonización completa y bajo los mismos criterios entre los Estados miembro. Sin embargo, unos requisitos técnicos armonizados demasiado precisos o estrictos pueden plantear problemas con el enfoque caso por caso (según tipo de escoria o aplicación) ya que determinados límites, procedimientos de ensayo u otros aspectos, pueden bloquear injustificadamente el uso de éstas.

El trabajo administrativo y técnico que se realiza detrás de cada expediente requiere un amplio conocimiento de las diferentes leyes a nivel europeo y de los aspectos técnicos, por lo que resulta crucial una buena comunicación entre las empresas y las autoridades públicas.

Independientemente de su clasificación como producto, subproducto o fin de condición de residuo, las escorias deben estar registradas bajo el *Reglamento REACH*. Otra legislación relevante es la *Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre, por la que se establece un marco de actuación comunitaria en el ámbito de las políticas de aguas* y la *Directiva 2006/118/CE, de 12 de diciembre, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro*, que influyen en las condiciones de las escorias cuando se utilizan, por ejemplo, en la construcción de carreteras con objeto de controlar la posible lixiviación de sustancias peligrosas a partir de la escoria utilizada, así como el *Reglamento (UE) nº 305/2011, de 9 de marzo, por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de la construcción*.

En cuanto al registro *REACH*, el documento pone de manifiesto el coste y el esfuerzo que conlleva su inscripción. Además, el hecho de que en algunos países la escoria es aceptada como residuo y en otros como subproducto se traduce en que un mismo valorizador debe cumplir con la legislación de residuos y con la de productos, produciéndose una doble regulación.

En relación al tratamiento, el documento diferencia entre los tratamientos de las escorias no ferrosas, consistentes en extraer todo el contenido metálico posible antes de su venta para su uso en la construcción de carreteras, infraestructuras o edificación, o su envío a vertedero, y los tratamientos de las escorias ferrosas que pueden variar en función del uso final y que consisten en el enfriamiento (lento o rápido), su modificación física (trituration, tamizado o molienda) o la adición de sustancias específicas como arena u oxígeno, con objeto de influir en las propiedades de la escoria para cumplir con los requisitos pertinentes reflejados en las distintas normas europeas o nacionales que sean de aplicación. Por su parte, las escorias de ferroaleaciones suelen utilizarse directamente previa trituración y cribado para lograr el tamaño requerido por el cliente.

Según el análisis realizado, el documento concluye que la figura de subproducto solo es posible para unas determinadas escorias no peligrosas (la reintroducción de productos con propiedades peligrosas podría ser contradictoria con los principios de economía circular) y que no necesiten ningún tratamiento puesto que a) el uso ulterior es seguro aunque no está garantizado debido a la competencia con otros materiales, b) no se garantiza el uso directo de la escoria en estado líquido, lo que conlleva etapas de tratamiento como el enfriamiento, la reducción de tamaño o la adición de otras sustancias que deben analizarse en profundidad para poder considerarlas como una práctica industrial habitual, c) las escorias se producen de manera inevitable y como parte integrante del proceso de producción principal, y d) algunas escorias no ferrosas pueden poseer propiedades y sustancias peligrosas que generen riesgos relacionados con el nivel de

biodisponibilidad, aunque se puede aplicar el principio de precaución si no se conoce con certeza el destino final o el ciclo de vida posterior.

En cuanto a la desclasificación de las escorias mediante criterios fin de condición de residuo se considera que a) las escorias se destinan a fines específicos como material de construcción en diferentes aplicaciones, b) existe un mercado para las aplicaciones propuestas aunque no está garantizado en todos los contextos debido a la competencia con otros materiales, c) los requisitos técnicos pueden cumplirse desde el inicio o mediante operaciones de pretratamiento como el enfriamiento, la reducción de tamaño o la adición de sustancias a la escoria, el final de la fase de pretratamiento define el punto de fin de condición de residuo, y d) algunas escorias no ferrosas, pueden generar efectos adversos para el medio ambiente o la salud humana debido a su contenido de sustancias peligrosas y/o sus propiedades peligrosas (especialmente metales pesados, que pueden generar un potencial impacto tanto al suelo como a las aguas), debiendo aplicar el principio de precaución si no se conoce con certeza el destino y aplicación final. La gestión del riesgo puede ser objeto de debate y análisis.

El documento concluye que, para los grandes flujos de escoria, como la escoria de alto horno o la escoria de acero, la figura de subproducto podría aplicarse desde el inicio, mientras que para otros tipos de escorias que necesiten un tratamiento más exhaustivo podrían obtener el fin de la condición de residuo después del tratamiento. No obstante, señala que los posibles impactos al medio ambiente y la salud de las personas derivados del contenido de sustancias peligrosas sigue siendo una cuestión importante a tener en cuenta. Se aconseja:

- Desarrollar normas o estándares para toda la Unión Europea sobre las condiciones de la escoria y de sus aplicaciones bajo los cuales las escorias pueden ser clasificadas bajo el fin de la condición de residuo.
- Definir estas normas para cada tipo de escoria.
- Crear un marco común que regule las condiciones de las escorias a través de un reglamento, que incluya métodos de ensayos y análisis compatibles en todos los Estados miembro.
- Establecer condiciones estrictas de contenido en sustancias peligrosas, teniendo en cuenta el principio de precaución.

## 4.5 OTROS ESTUDIOS

- o **Study to support the preparation of Commission Guidelines on the definition of backfilling<sup>56</sup>**

El objetivo del estudio es contribuir a la elaboración de un documento de orientación sobre el relleno para garantizar la aplicación uniforme en toda la Unión Europea y de esta manera dar cumplimiento a lo establecido en el artículo 38.2 de la Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19

---

<sup>56</sup> *European Commission. Study to support the preparation of Commission Guidelines on the definition of backfilling. 2020.*

de noviembre de 2008 sobre los residuos, que establece que la Comisión elaborará directrices sobre la definición de relleno.

La Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo, modificó el artículo 3, apartado 17, letra a), de la Directiva 2008/98/CE e introdujo la siguiente definición de relleno: *cualquier operación de recuperación en la que se utilicen residuos adecuados y no peligrosos con fines de recuperación en zonas excavadas o con **fines de ingeniería en el paisaje***<sup>57</sup>. Los residuos utilizados para el relleno deben **sustituir a los materiales no residuales, ser adecuados para los fines mencionados y limitarse a la cantidad estrictamente necesaria para lograr dichos fines**. Por lo tanto, señala que el concepto de "relleno" debe cumplir tres criterios principales:

1. **Ausencia de riesgo** para la salud humana y el medio ambiente: los residuos utilizados deben ser adecuados y no peligrosos y, en consonancia con las disposiciones generales de la directiva, no deben causar impactos adversos en la salud humana o el medio ambiente;
2. Finalidad específica: los residuos se utilizan con **fines de recuperación en zonas excavadas o con fines de ingeniería en el ámbito paisajístico**; de lo contrario, la operación debe clasificarse como recuperación de materiales distintos del relleno; y
3. Eficiencia de los recursos y principios de la economía circular: la cantidad de residuos utilizados para el relleno debe **limitarse a la cantidad estrictamente necesaria y debe sustituir a los materiales que no son residuos**, de lo contrario la operación debe clasificarse como eliminación. En consonancia con los principios de la economía circular, **el reciclaje debe tener prioridad sobre el relleno**.

En el apartado 5 del documento se analizan las diferentes aplicaciones que se pueden considerar relleno según la definición actual de la directiva. Entre otras, se señala que el documento de trabajo de los servicios de la Comisión Europea sobre Green Public Procurement<sup>58</sup> reconoce el relleno como una opción de recuperación para la construcción y demolición de carreteras con unas determinadas condiciones de uso. Entre estos criterios, se indica que *"No se debería permitir el relleno en zonas verdes fuera de la calzada. El relleno en las zonas permeables de la carretera se realizará únicamente con materiales y suelos excavados. Los **materiales reutilizados, reciclados y recuperados sólo se utilizarán para el relleno de las zonas impermeables de la carretera**. "*

Cabe señalar que, como materiales reutilizados, reciclados y recuperados, la guía incluye los residuos de construcción y demolición (hormigón, mezclas bituminosas recuperadas, áridos recuperados de los elementos principales de la carretera o de elementos auxiliares.

---

<sup>57</sup> A los efectos de esta guía, la ingeniería paisajística incluye las estructuras de ingeniería que afectan al paisaje para cumplir una función específica, por ejemplo, barreras acústicas, defensas contra inundaciones y diques, **terraplenes de carreteras**, usos recreativos (como pistas de esquí), así como las actividades paisajísticas para mejorar el aspecto visual de una zona, como la recultivación y la restauración.

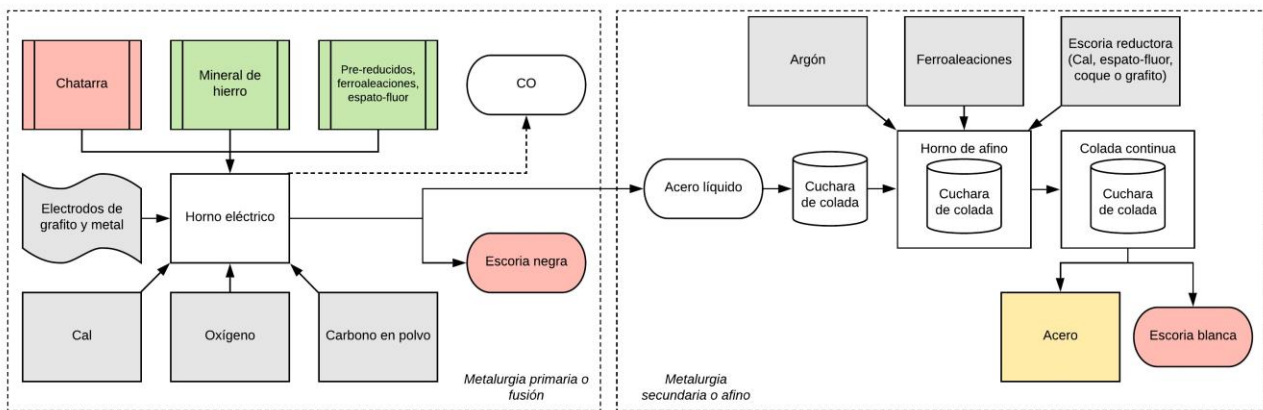
<sup>58</sup> European Commission. Commission Staff Working Document EU Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance. 2016.

[https://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/GPP%20criteria%20Roads%20\(2016\)%20203.pdf](https://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/GPP%20criteria%20Roads%20(2016)%20203.pdf)

## 5. ESCORIAS DE ACERO AL CARBONO DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

El proceso por vía eléctrica de fabricación de aceros al carbono se compone de dos etapas: una primera denominada metalurgia primaria o fusión que se realiza en el horno de arco eléctrico y la segunda denominada metalurgia secundaria o afino, que se inicia en el horno de arco eléctrico y finaliza en el horno-cuchara (afino). Cada una de las dos etapas, fusión y afino, genera un tipo diferente de escoria denominada escoria negra y escoria blanca, respectivamente.

Imagen 5-1. Proceso de generación de escorias de acero al carbono.



En España el 70 % de la producción de acero se lleva a cabo en hornos de arco eléctrico, por lo que en nuestro país se genera un mayor volumen de escorias de acería, tanto negras como blancas. Además, el reparto geográfico de las acerías no es homogéneo, concentrándose mayoritariamente en el norte del país; con mayor intensidad en el País Vasco, donde la separación entre plantas no supone grandes distancias. Esto implica que la presión que entraña la generación de escorias es mayor en ciertas zonas geográficas.

Tabla 5-1. Generación de escoria de acería por CCAA. Año 2007.<sup>59</sup>

| Comunidad Autónoma | Generación (%) |
|--------------------|----------------|
| País Vasco         | 48             |
| Cataluña           | 15,4           |
| Andalucía          | 11,3           |
| Cantabria          | 7,6            |
| Madrid             | 6,7            |
| Galicia            | 5              |
| Extremadura        | 4              |
| Aragón             | 1,5            |

<sup>59</sup> CEDEX. *Ficha Técnica: Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico*. 2013.

Según datos de UNESID, la producción total de acero del sector siderúrgico español en 2018 fue de 14,3 millones de toneladas, siendo el 65,7% producido por medio de hornos de arco eléctrico, lo que se traduce en la producción de 9,3 millones de toneladas de acero por vía eléctrica. Aproximadamente, y según distintas fuentes consultadas, cada tonelada de acero producido genera alrededor de 130 kg de escoria negra y 25 kg de escoria blanca, lo que equivaldría a una producción de escorias negras y blancas de alrededor de 1.200.000 y 230.000 toneladas, respectivamente.

**Tabla 5-2. Producción de escorias de acería estimada en el año 2018 según datos de producción de acero de UNESID.**

| Generación de escoria (kg/t de acero) |     | Producción de escorias (t) |
|---------------------------------------|-----|----------------------------|
| Escoria negra                         | 130 | 1.200.000                  |
| Escoria blanca                        | 25  | 230.000                    |

Esto supone que la generación de escoria negra es, aproximadamente, el 13% del volumen en peso total de acero producido por medio de hornos de arco eléctrico, y su volumen de generación es 5 veces mayor al de la escoria blanca.

El código LER asociado a este tipo de escorias es el *10 02 02* especificado a continuación:

*10. "Residuos de procesos térmicos".*

*10 02. "Residuos de la industria del hierro y del acero".*

*10 02 02. "Escorias no tratadas".*

Seguidamente, se analizan en profundidad los dos tipos de escoria de acero al carbono.

## **5.1 ESCORIA NEGRA**

### **5.1.1 Proceso productivo**

Las escorias negras de horno de arco eléctrico de la producción del acero al carbono se forman durante la fusión de las chatarras férricas, principal materia prima, y otras materias primas y fundentes como pequeñas cantidades de mineral de hierro, minerales prerreducidos (carga virgen), ferroaleaciones, cal, espato-flúor, coque y oxígeno. El proceso de fusión contempla las fases de oxidación, defosforación y formación de la escoria.

El proceso que da lugar a las escorias negras comienza con la introducción por la bóveda del horno de la chatarra junto con el resto de las materias primas. A continuación, se cierra el horno y se procede a hacer saltar el arco eléctrico que fundirá la chatarra mediante la alimentación de energía eléctrica. En este caso, se utilizan dos electrodos: uno de grafito y otro metálico. Cuando los electrodos entran en contacto con la chatarra y se hace saltar el arco eléctrico, se producen saltos entre los electrodos y la chatarra, como consecuencia de los espacios vacíos que se crean al fundirse la chatarra.

En cuanto se observa la existencia de líquido fundido debajo de los electrodos, debe procederse a la alimentación de cal, para cubrirlo superficialmente y generar la escoria, y de oxígeno puro, mediante un



sistema de lanzas que lo inyectan, que hará que el líquido fundido se oxide. Esta fase se conoce como fase oxidante u oxidación.

Esta oxidación es la primera en producirse debido a la gran cantidad de hierro presente en la chatarra. Seguidamente el óxido de hierro oxida al silicio y al manganeso. Los óxidos de hierro, manganeso y silicio pasan a formar parte de la escoria que cubre el líquido fundido. Cuando se ha oxidado prácticamente todo el silicio y gran parte del manganeso, se alimenta el carbono en polvo que permite la reducción del óxido de hierro presente en la escoria, generando monóxido de carbono. El paso del monóxido de carbono a través de la escoria produce lo que se conoce como escoria espumante.

Por otra parte, la presencia de cal en la escoria asegura la eliminación del fósforo del líquido fundido, elemento perjudicial que se manifiesta por una gran fragilidad del acero en frío, en la etapa denominada defosforación.

Finalmente, durante las fases de oxidación y defosforación se procede, por una de las puertas del horno, a la extracción de la escoria negra.

La producción de escoria negra es esencial para la producción del acero, ya que durante su proceso de formación absorben y reaccionan con los componentes no metálicos, controlando la calidad del acero final. Así mismo, protegen y purifican el baño metálico respondiendo también a los siguientes objetivos:

- Absorber los óxidos presentes tanto en los minerales de hierro como en los residuos férricos utilizados en el proceso de reciclado de la chatarra férrica, así como todas aquellas impurezas no adecuadas para la obtención de la calidad de acero que se está produciendo en un momento adecuado.
- Permitir el paso de los gases ocluidos en el baño y que son perjudiciales para el acero, como por el ejemplo el hidrógeno, y reducir la oxidación del acero líquido.
- Proteger los refractarios de los hornos del ataque químico del baño fundido.
- Actuar de aislante para mejorar la eficiencia energética.

### 5.1.2 Características y composición

Entre las características de la escoria negra figuran las siguientes:

**Tabla 5.1.2-1. Características de la escoria negra.**

| Propiedad       | Descripción  |
|-----------------|--|
| Aspecto         | Sólido rocoso inorgánico de granulometría variable |
| Color           | Gris   |
| Olor            | Inodoro  |
| pH              | 10-12,5  |
| Punto de fusión | >1.000°C   |
| Solubilidad     | < 100 mg/l   |
| Densidad        | 3-4 g/cm <sup>3</sup> (20 °C)                      |

La estructura de la escoria depende de la temperatura del enfriamiento controlado, si se enfría más rápidamente con agua la escoria será más porosa, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo, mientras que si se deja enfriar al aire será menos porosa, más compacta, dura y cristalina, debido a un enfriamiento más lento. Con todo, la porosidad es función también de la cantidad de gases ocluidos en las escorias en estado líquido durante los procesos de espumado en el horno de arco eléctrico.

Según indica la Nota Técnica NT 03/2020<sup>60</sup> del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), las escorias negras son las de mayor dureza, densidad, resistencia a la abrasión y desgaste, dentro de las escorias siderúrgicas. Las partículas son duras, con coeficientes de desgaste Los Ángeles entre 15% - 25%, y con un coeficiente de pulimento acelerado (PSV) comprendido entre 0,50 y 0,60. Destaca también sus desventajas, como su mayor densidad (3,3 t/m<sup>3</sup> - 3,7 t/m<sup>3</sup>) y humedad, la absorción de agua de la escoria negra suele estar comprendida entre 1% - 4% en volumen.

En cuanto a la composición mineralógica de la escoria negra, los análisis semicuantitativos de las fases cristalinas muestran un contenido de material amorfo del 40-50% y consisten principalmente en silicatos de calcio, ferritas y óxidos metálicos. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 5.1.2-2. Análisis semicuantitativo de las fases cristalinas de las escorias negras (%). UNESID.**

| Fase cristalina   | Solicitud de subproducto. Empresa 1 | Solicitud de subproducto. Empresa 2 | Solicitud de subproducto. Empresa 3 |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Silicato dicálcico (Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ) ortorrómbico (fase α') | 12-20                               | 6-18                                | 23-28                               |
| Silicato dicálcico (Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ) ortorrómbico (fase β') | 13-17                               | 10-32                               | <5-9                                |
| Gehlenita (Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub> )                 | 17-33                               | -                                   | 42-50                               |
| Hillebrandita (Ca <sub>2</sub> (SiO <sub>3</sub> )(OH) <sub>2</sub> )         | 6-9                                 | -                                   | -                                   |
| Wustita (FeO)   | 21-24                               | 6-33                                | 12-21                               |
| Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )                                   | <5-6                                | <5-15                               | <3-<5                               |
| Portlandita (Ca (OH) <sub>2</sub> )   | 5-7                                 | 5                                   | -                                   |
| Periclase   | -                                   | 15                                  | <3                                  |

En relación a la composición química general de las escorias negras estudiadas en España, tal y como indica la ficha técnica del CEDEX<sup>61</sup> y la distinta bibliografía consultada, se caracteriza por estar compuesta principalmente de óxido de hierro (FeO), con valores aproximados del 33%, seguido por el óxido de calcio (CaO), dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de manganeso (MnO).

<sup>60</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

<sup>61</sup> CEDEX. Ficha Técnica: Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico. 2013.

En las siguientes tablas se muestra la composición mayoritaria de la escoria negra, así como los componentes minoritarios presentes en la misma, a partir de la información aportada en las solicitudes de subproducto presentadas en una primera instancia. Con objeto de respetar la confidencialidad, estos datos se muestran con carácter anónimo. También se incluye la composición mayoritaria presente en la ficha técnica del CEDEX referenciada anteriormente.

**Tabla 5.1.2-3. Composición mayoritaria de la escoria negra (%).**

| Composición                         | Solicitud de subproducto. Empresa 1 |      | Solicitud de subproducto. Empresa 2 | CEDEX     |
|-------------------------------------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|-----------|
|                                     | A                                   | B    |                                     |           |
| FeO/ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 33,16                               | 41,5 | 11,2 - 20,9                         | 7 - 40    |
| CaO                                 | 29,46                               | 22,6 | 25,2 - 38,8                         | 23 - 32   |
| SiO <sub>2</sub>                    | 13,22                               | 12,5 | 15,0 - 20,9                         | 8 - 15    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | 6,48                                | 10,2 | 10,7 - 20,9                         | 3,5 - 7   |
| MgO                                 | 5,95                                | 3,0  | 2,3 - 5,4                           | 4,8 - 6,6 |
| MnO                                 | 4,90                                | 4,9  | 4,3 - 7,4                           | 2,5 - 4,5 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>       | 1,90                                | 0,34 | 0,2 - 1,6                           | -         |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | 1,37                                | 3,2  | 1,6 - 3,1                           | -         |
| TiO <sub>2</sub>                    | 0,51                                | 0,7  | -                                   | -         |
| F                                   | 0,30                                | -    | -                                   | -         |
| Na <sub>2</sub> O                   | 0,10                                | -    | -                                   | -         |
| K <sub>2</sub> O                    | 0,03                                | -    | -                                   | -         |

**Tabla 5.1.2-4. Componentes minoritarios de la escoria negra (mg/kg).**

| Componentes    | Solicitud de subproducto 1. (valores mínimo y máximo). 2018 | Solicitud de subproducto 1. (valores mínimo y máximo) en tres centros productores. 2016. |                 |                 | Solicitud de subproducto 2. Informe de muestreo y caracterización química. 2006 |
|----------------|---|--|-----------------|-----------------|---|
|                |   | A  | B               | C               |   |
| Arsénico (As)  | <5,0  | 3-10   | 1,0-2,5         | 3,1-4,7         | 0,456   |
| Bario (Ba)     | 374-2.425   | 2.200-2.500  | 470-550         | 1.800-2.100     | -   |
| Berilio (Be)   | <2  | 0,88-1,3   | 0,86-1,6        | 0,69-,079       | -   |
| Boro (B)       | 63-285  | 240-310  | <25-66          | 190-240         | -   |
| Cadmio (Cd)    | 24-32   | <0,2   | <0,2            | <0,2-1,6        | 2   |
| Cobalto (Co)   | 4-14  | 2,5-9,3  | <1,5-14         | 3,2-4,3         | 4   |
| Cobre (Cu)     | 49-315  | 210-530  | 46-60           | 210-260         | 286   |
| Aluminio (Al)  | -   | 45.000-55.000  | 20.000-23.000   | 41.000-47.000   | -   |
| Magnesio (Mg)  | -   | 17.000   | 39.000-46.000   | 22.000-28.000   | -   |
| Manganeso (Mn) | -   | 36.000-42.000  | 34.000-44.000   | 36.000-39.000   | 20.342  |
| Hierro (Fe)    | -   | 230.000-320.000  | 240.000-260.000 | 210.000-260.000 | 155.000   |
| Mercurio (Hg)  | <5  | <0,05  | <0,05           | <0,05           | 0,103   |
| Molibdeno (Mo) | 2-183   | 22-40  | 18-20           | 16-26           | -   |

| Componentes    | Solicitud de subproducto 1. (valores mínimo y máximo). 2018 | Solicitud de subproducto 1. (valores mínimo y máximo) en tres centros productores. 2016. |             |             | Solicitud de subproducto 2. Informe de muestreo y caracterización química. 2006 |
|----------------|---|--|-------------|-------------|---|
|                |   | A  | B           | C           |   |
| Níquel (Ni)    | 16-94   | 19-100   | 6,1-21      | 29-49       | 54  |
| Plomo (Pb)     | 11-46   | <10  | <10-11      | 12-32       | 181   |
| Antimonio (Sb) | 2 - 2.017   | <1-3,9   | <1          | 1,3-1,8     | 0,11  |
| Selenio (Se)   | <5  | 1,2-1,4  | <1-1,7      | 1,2-1,5     | -   |
| Estaño (Sn)    | 2-33  | 15-36  | 3,1-4,2     | 26-39       | 138   |
| Titanio (Ti)   | -   | 2.900-3.200  | 2.200-2.400 | 2.400-2.900 | 3.158   |
| Vanadio (V)    | 503-2.325   | 530-560  | 2.100-2.500 | 530-570     | 464   |
| Zinc (Zn)      | 193   | 170-240  | 85-250      | 550-910     | -   |
| Cromo (Cr)     | -   | 2.700-3.500  | 3.700-4.800 | 2.000-3.000 | 2.435   |
| Cromo VI       | -   | <0,4   | <0,4-1      | <0,4        | -   |
| Wolframio (W)  | -   | 530-570  | 33-91       | 61-180      | -   |
| Fluoruros      | -   | 39-77  | 46-87       | <25-96      | -   |
| Azufre (S)     | -   | 1.200  | 940-2.100   | 1.300-1.400 | -   |

Como puede apreciarse en la tabla anterior, la escoria negra posee un gran contenido en hierro, manganeso, aluminio, magnesio y titanio procedente de sus componentes principales. También se evidencia una notable presencia de bario, boro, cobre, vanadio, zinc, cromo y azufre. El alto valor detectado de antimonio en uno de los análisis parece tratarse de un valor no representativo si se compara con el resto de las analíticas.

### 5.1.3 Tratamiento y valorización de las escorias negras

El proceso de valorización de las escorias negras consta de las siguientes etapas que tratan de garantizar la estabilidad volumétrica, la calidad y el tamaño del material granular resultante con objeto de comercializarse para sus diferentes aplicaciones finales, detalladas en profundidad posteriormente en el presente estudio.

Cabe señalar que la escoria negra puede recibir también tratamientos en estado fundido en el horno, como la adición de aluminatos o la adición de O<sub>2</sub> y SiO<sub>2</sub>, así como otras sustancias de estabilización (ej. bórax), con el objetivo de modificar las propiedades de la escoria para cumplir con los requisitos de los estándares europeos y nacionales relativos, por ejemplo, a la estabilidad del volumen.

- Almacenamiento y enfriamiento

La escoria negra, una vez producida, se vierte en zonas de acopio. Con objeto de evitar la contaminación de la escoria negra con otro tipo de materiales se deben asegurar espacios de acopio de escorias suficientemente compartimentados, así como establecer una separación física suficiente entre acopios que garantice que la escoria blanca no entra en contacto con la escoria negra.

Según la Nota Técnica 03/2020<sup>62</sup> del MITMA, está expresamente prohibida la mezcla de escorias negras y blancas para su empleo como material granular en cualquiera de los elementos que constituyen la estructura de un firme de carreteras. La detección de la presencia de escoria blanca en cualquier lote suministrado a la obra debe suponer el rechazo de todo el material de la misma procedencia, así como del suministrador de este material.

El enfriamiento puede consistir en regado con agua (enfriamiento rápido), volteo y/o acopio del material al aire (enfriamiento moderado) u otros procesos de carbonatación acelerada dirigidos a transformar los compuestos expansivos en carbonatos. El enfriamiento por agua produce escorias muy porosas, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo. El enfriamiento por aire produce escorias menos porosas, más compactas, más duras y cristalinas.

- Estabilización de compuestos expansivos (maduración o envejecimiento)

La estabilización de los compuestos potencialmente expansivos, contenidos en origen en la escoria negra, se debe garantizar por medio de procesos de maduración o envejecimiento sobre ésta de forma previa a su acondicionamiento o sobre el árido siderúrgico una vez acondicionado.

El regado y volteo (ciclos de humedad-sequedad) de las escorias en los acopios se revela como un remedio eficaz para su estabilización antes de su utilización ulterior. La simple disposición de las escorias sin volteos sólo se estima útil en los primeros 20 cm de profundidad, por lo que la práctica de moverlas periódicamente resulta muy adecuada para conseguir un producto homogéneo y adecuado para las distintas aplicaciones finales.

En las escorias negras se dan valores de expansión variable de entre el 0,5 al 2% en función de los tipos de acero producido. El periodo de maduración necesario para garantizar expansiones inferiores al 1% es variable en función del proceso de obtención de cada acería. A medida que se ha ido progresando en el estado del conocimiento y la tecnología, algunos procedimientos de envejecimiento de la escoria han llegado a garantizar expansiones inferiores al 1% tras dos días de enfriamiento, volteo y humectación.

Generalmente, el período de estabilización de la escoria puede variar entre 72 horas (obteniendo expansiones inferiores al 1%) y 4 meses (garantizando expansiones en torno al 0,3%) en función del tipo de escoria, el proceso de enfriamiento, el objetivo de expansión deseable para su uso posterior y el procedimiento de envejecimiento adoptado.

---

<sup>62</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

Tabla 5.1.3-1. Evolución de la cal libre, MgO libre y SO<sub>3</sub> en procesos de envejecimiento de escoria negra<sup>63</sup>.

| Escorias/Slag<br>Interv. granulométricos /<br>Particle size Intervals  | Cal libre / Free CaO (%) |                |                |
|--|--------------------------|----------------|----------------|
|  | 0 día / days             | 45 días / days | 90 días / days |
| EHAE1* / 0-6 mm  | 0.09                     | 0.00           | 0.00           |
| EHAE1 / 6-13 mm  | 0.00                     | 0.00           | 0.00           |
| EHAE1 / 13-23 mm   | 0.06                     | 0.00           | 0.00           |
| EHAE2 / 0-6 mm   | 0.00                     | 0.00           | 0.00           |
| EHAE2 / 6-13 mm  | 0.06                     | 0.00           | 0.00           |
| EHAE2 / 13-23 mm   | 0.06                     | 0.00           | 0.00           |
| Escorias/Slag<br>Interv. granulométricos /<br>Particle size Intervals  | SO <sub>3</sub> (%)      |                |                |
|  | 0 días / days            | 45 días / days | 90 días / days |
| EHAE1 / 0-6 mm   | 0.57                     | 0.30           | 0.31           |
| EHAE1 / 6-13 mm  | 0.35                     | 0.28           | 0.30           |
| EHAE1 / 13-23 mm   | 0.29                     | 0.20           | 0.18           |
| EHAE2 / 0-6 mm   | 0.13                     | 0.10           | 0.09           |
| EHAE2 / 6-13 mm  | 0.14                     | 0.05           | 0.05           |
| EHAE2 / 13-23 mm   | 0.15                     | 0.12           | 0.10           |
| Escorias /Slag<br>Interv. granulométricos /<br>Particle size Intervals | Free MgO (%)             |                |                |
|  | 0 días / days            | 45 días /days  | 90 días /days  |
| EHAE1 / 0-6 mm   | 0.90                     | 0.30           | 0.20           |
| EHAE1 / 6-13 mm  | 0.90                     | 0.30           | 0.18           |
| EHAE1 / 13-23 mm   | 0.80                     | 0.24           | 0.15           |
| EHAE2 / 0-6 mm   | 0.80                     | 0.80           | 0.70           |
| EHAE2 / 6-13 mm  | 0.50                     | 0.50           | 0.45           |
| EHAE2 / 13-23 mm   | 0.80                     | 0.45           | 0.20           |

\* EHAE / EAFS.

Tal y como puede observarse en la tabla anterior, el proceso de envejecimiento produce una reducción en el contenido de compuestos expansivos presentes en las escorias (sulfatos y magnesia libre) y la total desaparición de la cal libre, debido a su alta solubilidad en agua. El envejecimiento es principalmente efectivo durante los primeros 45 días, estabilizándose a partir de ese momento.

No obstante, la Nota Técnica 03/2020<sup>64</sup> del MITMA refleja que pese a lo indicado en el artículo 510. Ahorras del PG-3, en relación al periodo mínimo de envejecimiento con agua de tres meses, se ha observado que este aspecto no es relevante y que el periodo necesario vendrá establecido por los resultados de los ensayos de expansión. En la mayoría de los casos, el aspecto más relevante para reducir este tipo de fenómenos expansivos es el procedimiento de enfriamiento utilizado.

- Molienda, machaqueo y cribado

La escoria debe triturarse utilizando cualquier tecnología de machaqueo disponible con el objetivo de alcanzar un determinado tamaño de grano y un grado de mezcla similar al de los áridos naturales. Estos

<sup>63</sup> M. Frías. Árido siderúrgico en hormigones: proceso de envejecimiento y su efecto en compuestos potencialmente expansivos. 2010.

<sup>64</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

tamaños han de concretarse al inicio del proceso de acuerdo con los usos comerciales requeridos por el mercado. Durante este proceso es habitual humectar las escorias negras de cara a facilitar las operaciones.

El material resultante se debe clasificar y acopiar atendiendo a fracciones granulométricas diferenciadas, en función de los usos comerciales.

- Desmetalización o desferretización

Con objeto de extraer el máximo contenido de hierro metálico debe realizarse una separación mediante procesos magnéticos, habitualmente realizada por medio de vehículos con electroimán y/o mesas densimétricas. Este procedimiento es realizado en dos ocasiones, después del enfriamiento y después del machaqueo.

El fin de la extracción del contenido metálico es doble, por una parte, separar los metales de las escorias de manera que puedan ser valorizados y, por otra, evitar la introducción de elementos metálicos no deseados en la escoria, desde el punto de vista granulométrico y de alteración de propiedades físicas, de cara a un uso posterior.

- Caracterización

Paso previo a la expedición del material resultante, procedente del tratamiento de la escoria negra, debe determinarse el potencial de lixiviación, el contenido total en metales pesados, así como la expansividad sin perjuicio del cumplimiento de los requisitos técnicos de las aplicaciones finales a las que se destinen las escorias tratadas.

Todas las etapas citadas anteriormente, exceptuando el enfriamiento, pueden realizarse bien por el productor de las escorias o bien por un tercero, en los mismos centros de producción de acero o en plantas externas y deben tener en cuenta las MTD<sup>65</sup>, de cara a la protección del medio ambiente. Por ejemplo, es habitual en las instalaciones de procesado de escorias la humectación de las zonas de trasiego de camiones con el fin de minimizar la emisión de partículas difusas, así como la limpieza periódica de dichas zonas y la humectación de los acopios de escorias.

Según la Nota Técnica NT 03/2020<sup>66</sup>, la mayor parte de los inconvenientes asociados a la utilización de las escorias (riesgo de expansión, mayor densidad, absorción y, por tanto, mayor humedad) pueden atenuarse o eliminarse por completo adoptando las precauciones necesarias durante su producción (forma de enfriamiento y tratamiento), mediante un cuidadoso diseño de mezclas, o ajustando oportunamente los procedimientos de fabricación y puesta en obra.

---

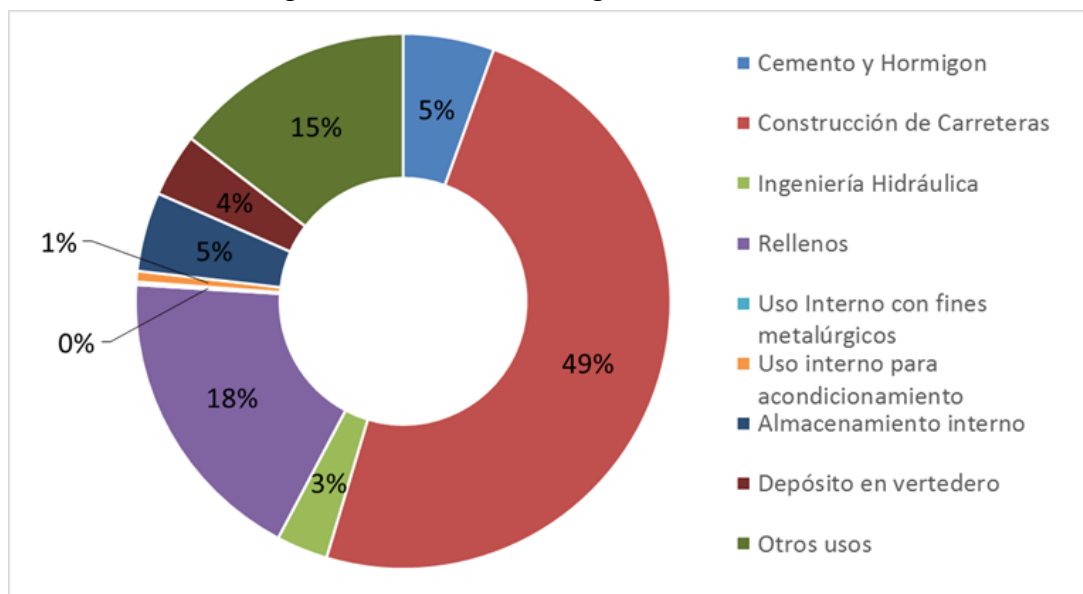
<sup>65</sup> JRC Reference Report. 2013. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production*.

<sup>66</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

### 5.1.4 Aplicaciones

Según datos de UNESID, de las 964.272 toneladas de escoria negra producidas en 2016, un 18% se utilizó en aplicaciones no ligadas (rellenos) y un 49% se utilizó en construcción de carreteras, no pudiendo diferenciar entre aplicaciones ligadas o no. Una pequeña parte, alrededor del 4%, tuvo como destino el vertedero debido principalmente a impedimentos de tipo técnico y legal.

Imagen 5.1.4-1. Usos escoria negra 2016. Fuente UNESID.



En algunas CCAA como el País Vasco la tasa de valorización de las escorias negras alcanza el 85%<sup>67</sup>, siendo las principales vías de valorización la utilización de la escoria negra para obras de viales de carreteras y urbanizaciones industriales. El *Plan de Prevención y Gestión de Residuos del País Vasco 2020* establece como objetivo alcanzar una tasa de reciclaje de un 75% de las escorias negras de acería para 2016 y de un 90% para 2020, lo que pone de manifiesto su utilización.

#### 5.1.4.1 Uso como árido. Aplicaciones no ligadas de la escoria negra

Las aplicaciones no ligadas son aquellas en que los materiales granulares se colocan compactados en sucesivas capas para la ejecución de diversas unidades de obra civil, sin que se adicione conglomerante alguno. También se pueden incluir las aplicaciones en las que no se requiera su compactación como puede ser el caso, por ejemplo, de su aplicación como balasto.

Según la documentación facilitada por UNESID, la escoria negra puede utilizarse en el proceso de elaboración de áridos, en sustitución de áridos naturales o reciclados, principalmente para su uso como zahorra, grava, balasto (sub-balasto) y rellenos.

<sup>67</sup> *Inventario Residuos No Peligrosos del País Vasco 2016. Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda. Abril 2018.*



a) Zahorra

Según el *artículo 510* del PG-3 la zahorra es un material granular, de granulometría continua (es decir una mezcla de árido grueso y árido fino), constituido por partículas total o parcialmente trituradas, en la proporción mínima que se especifique en cada caso y que es utilizado como capa de firme.

La zahorra, al contener una proporción de finos, se puede compactar. Su cometido es crear firmes, para lo cual se humedece y se suele compactar por tongadas. Una posibilidad es crear un firme para que se transite directamente sobre él, pero también es posible que se utilice como una base para otro firme que será el transitado, o lo que es lo mismo, que sirva para crear una sub-base de zahorra, no siendo necesario en general colocar un plástico para separarlo de la capa superior puesto que, a diferencia de la capa de grava, la zahorra está completamente compactada y no habrá manera de que el hormigón (o cualquier otro tipo de aglomerado) se pueda mezclar con ella, constituyendo siempre dos elementos independientes.

**Imagen 5.1.4.1-1. Esquema de composición de las estructuras de firme y explanada<sup>68</sup>**



b) Relleno localizado

Según el *artículo 332* del PG-3 el relleno localizado es la unidad que consiste en la extensión y compactación de suelos, procedentes de excavaciones o préstamos, en relleno de zanjas, trasdós de obras de fábrica, cimentación o apoyo de estribos o cualquier zona que, por reducida de su extensión, compromiso estructural u otra causa no permita la utilización de los mismos equipos de maquinaria con que se lleva a cabo la ejecución del resto de relleno, o bien exija unos cuidados especiales en su construcción.

En general para la realización de rellenos, en primer lugar, será necesaria la preparación de la superficie de asiento de estos. Posteriormente, los materiales de relleno se extienden en tongadas sucesivas de espesor uniforme. El espesor de estas tongadas será lo suficientemente reducido para que, con los medios disponibles, se obtenga en todo su espesor el grado de compactación exigido. Los materiales de cada tongada

<sup>68</sup> Gobierno Vasco. Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco. 2012.

serán de características uniformes y si no lo fueran, se conseguirá esta uniformidad mezclándolos convenientemente con los medios adecuados.

Durante la ejecución de los rellenos, la superficie de las tongadas debe tener la pendiente transversal necesaria para asegurar la evacuación de las aguas sin peligro de erosión. Una vez extendida cada tongada, se procede a su humectación, si es necesario. Conseguida la humectación más conveniente, se procede finalmente a la compactación mecánica de la tongada.

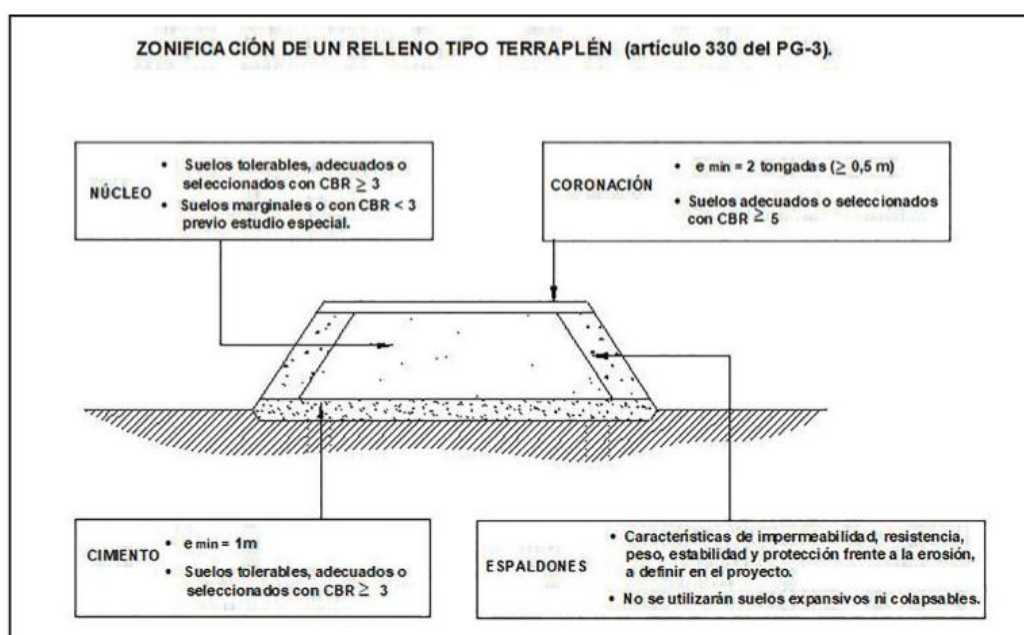
c) Relleno tipo terraplén

Según el artículo 330 del PG-3 el terraplén consiste en la extensión y compactación, por tongadas, de los materiales cuyas características se definen en el apartado 330.3, en zonas de tales dimensiones que permitan de forma sistemática la utilización de maquinaria pesada con destino a crear una plataforma sobre la que se asiente el firme de una carretera.

En los rellenos tipo terraplén se distinguen las zonas siguientes, cuya geometría se definirá en el proyecto:

- Coronación: Es la parte superior del relleno tipo terraplén, sobre la que se apoya el firme, con un espesor mínimo de dos tongadas y siempre mayor de cincuenta centímetros (50 cm).
- Núcleo: Es la parte del relleno tipo terraplén comprendida entre el cimientado y la coronación.
- Espaldón: Es la parte exterior del relleno tipo terraplén que, ocasionalmente, constituirá o formará parte de los taludes del mismo. No se considerarán parte del espaldón los revestimientos sin misión estructural en el relleno entre los que se consideran, plantaciones, cubierta de tierra vegetal, encachados, protecciones antierosión, etc.
- Cimientado: Es la parte inferior del terraplén en contacto con la superficie de apoyo. Su espesor será como mínimo de un metro (1 m).

**Imagen 5.1.4.1-2. Zonificación de un relleno tipo terraplén conforme al art. 330 del PG-3. CEDEX, 2020.**



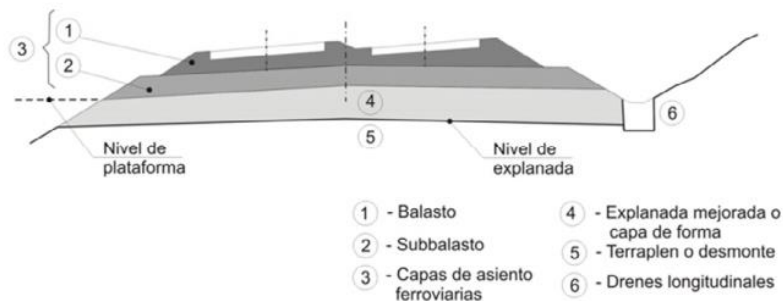
En el artículo 330.3, se definen los materiales a emplear en rellenos tipo terraplén que serán, con carácter general, suelos o materiales locales que se obtendrán de las excavaciones realizadas en obra, de los préstamos que se definan en el Proyecto o que se autoricen por el Director de las Obras. Además de los suelos naturales, se incluye la posibilidad de poder utilizar los productos procedentes de procesos industriales o de manipulación humana, siempre que cumplan las especificaciones del PG-3 y que sus características físico-químicas garanticen la estabilidad presente y futura del conjunto y conforme a lo dispuesto en la legislación vigente en materia medioambiental, de seguridad y salud, y de almacenamiento y transporte de productos de construcción.

d) Balastos y sub-balastos de vías férreas

El balasto es el árido empleado para la construcción de vías de ferrocarril compuesto habitualmente por partículas de entre 31,5 mm y 63 mm. El sub-balasto constituye la capa inferior de la plataforma sobre la que apoya el balasto. Ambas constituyen las denominadas capas de asiento o de soporte de la vía, que son las responsables de su comportamiento en cuanto a rigidez, alineación, nivelación y drenaje.

El balasto está constituido por piedra machacada de gran resistencia al desgaste y con granulometría uniforme, mientras que el sub-balasto está compuesto por grava arenosa de granulometría continua, compactada, no deformable al paso de la maquinaria en obra y de baja permeabilidad, con el fin de proteger a la plataforma de la lluvia.

Imagen 5.1.4.1-2. Sección transversal ferroviaria<sup>69</sup>



5.1.4.1.1 *Viabilidad técnica de la escoria negra. Aplicaciones no ligadas*

Según la documentación facilitada por UNESID, la escoria negra cumpliría, por lo general, las especificaciones técnicas de aplicación como árido, presentando un potencial expansivo bajo, pero que debe considerarse para dar cumplimiento a ciertas especificaciones, como en la construcción de carreteras. Apunta también que, en ocasiones, adicionando áridos naturales se pueden mejorar las prestaciones de la escoria para la puesta en obra como en la extensión o la compactación.

<sup>69</sup> Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio, por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal.

a) Zahorra

○ **Documentación facilitada por UNESID**

Según indicaciones de UNESID, la escoria negra, adecuadamente acondicionada, puede utilizarse como zahorra artificial en sustitución de zahorras para su uso en capas granulares tales como bases, subbases, coronación de explanadas y explanadas mejoradas, debido a su alta densidad, el valor bajo al impacto, la resistencia a la compresión, la resistencia al desgaste, así como por su capacidad de carga portante.

Entre la documentación facilitada figura la *Guía de Criterios Actualizados para el Empleo de Escoria Negra de Acería de Horno Eléctrico de Arco (HEA), de Acería LD, y de Horno Alto, como Árido para Capas Granulares y Pavimentos de Hormigón en la Construcción de Carreteras*<sup>70</sup>, desarrollada en septiembre de 2018, que indica que las escorias negras cumplen las especificaciones técnicas que exigen los pliegos de carreteras para áridos de capas granulares en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras, terraplenes y rellenos.

La escoria negra posee generalmente, según este documento, una proporción baja de cal libre (CaO) y una presencia mínima de magnesia libre (MgO) como para que puedan generar efectos indeseados de inestabilidad volumétrica rápidos debido a la hidratación de estas.

Se dan valores de expansión variables: <0,5% en escorias de acero de baja aleación y entre 0,1 a 1,5% en escorias de acero de baja aleación y alta resistencia. Esta propiedad debe analizarse previamente por cada tipo de escoria mediante ensayos de expansión (UNE-EN 1744-1<sup>71</sup> a 168h), delimitando los umbrales de expansión de los lotes a emplear, y contrastarse con los valores límite admisibles, establecidos para el tipo de aplicación y/o prescripciones técnicas del PG-3 en cada caso.

Cabe señalar que el artículo 510 Zahorras del PG-3 indica que *el árido siderúrgico de acería deberá presentar una expansividad inferior al cinco por ciento (< 5%) (norma UNE-EN 1744-1). La duración del ensayo será de veinticuatro horas (24 h) cuando el contenido de óxido de magnesio (norma UNE-EN 196-2) sea menor o igual al cinco por ciento (MgO ≤ 5%) y de ciento sesenta y ocho horas (168 h) en los demás casos. Además, el Índice Granulométrico de Envejecimiento (IGE) (NLT-361) será inferior al uno por ciento (< 1%) y el contenido de cal libre (UNE-EN 1744-1) será inferior al cinco por mil (< 5‰).*

Cuando se obtiene una expansión excesiva, la expansión debe ser reducida previamente mediante un tratamiento, que contemple una maduración o envejecimiento por aire y/o agua durante un periodo de 3 meses aproximadamente. Actualmente se están estudiando técnicas de envejecimiento acelerado basado en la “carbonatación acelerada” de las escorias, aunque tan solo de forma experimental.

Las escorias negras tienen una elevada densidad aparente, entre 3 y 4 g/cm<sup>3</sup>, por encima de la de los áridos naturales, situada en torno a 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Esta diferencia interfiere en las dosificaciones y en los costes del

---

<sup>70</sup> Fundación Tecnalía Research & Innovation. *Guía de Criterios Actualizados para el Empleo de Escoria Negra de Acería de Horno Eléctrico de Arco (HEA), de Acería LD, y de Horno Alto, como Árido para Capas Granulares y Pavimentos de Hormigón en la Construcción de Carreteras*. 2018.

<sup>71</sup> UNE-EN 1744-1:2010+A1:2003. *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*.

transporte, mayores que para los de un árido natural. Algunos documentos señalan que su empleo no sale rentable a distancias superiores a 40-60 km.

La absorción de agua de la escoria presenta en general valores entre 1% y 4% en volumen. La absorción puede influir en la durabilidad si el árido va a estar sometido a ciclos de hielo-deshielo o humedad-sequedad. Esta propiedad se deberá tener en cuenta en las dosificaciones durante la puesta en obra.

Las partículas de la escoria negra son relativamente duras, con coeficientes de desgaste de Los Ángeles entre el 13 y 15% y con un excelente coeficiente de pulimento acelerado. Así mismo, presentan una porosidad mucho mayor que la de un árido natural, pudiendo ser controlada variando el método y la velocidad de enfriamiento: cuanto más lento, menor es la porosidad resultante.

Otro aspecto a tener en cuenta es que los lixiviados de estas escorias pueden tener un pH superior a 11, y, por tanto, presentar problemas de corrosión en las tuberías de aluminio y acero que se coloquen en contacto directo con ellas. Se han registrado casos de obturación de los sistemas de drenaje con los carbonatos precipitados por la reacción del hidróxido de calcio de los lixiviados con el dióxido de carbono de la atmósfera.

- **Documentación facilitada por Siderúrgica Sevillana**

Según indicaciones de Siderúrgica Sevillana, la escoria negra puede utilizarse como árido en sustitución de zahorras o zahorras recicladas en capas granulares como bases, subbases y coronación de explanadas en base a las pruebas piloto realizadas.

Estas pruebas, realizadas con una proporción de 90% de escoria negra y 10% de árido natural, señalan que la escoria negra tratada presenta buenas características de capacidad de carga portante, especialmente como zahorra de granulometría 0/20. El índice CBR<sup>72</sup> de este tipo de zahorra con escoria negra es del orden de 78 (compactación 95%) y 94 (compactación 100%). Los valores de CBR cercanos a 0 representan a suelos de pobre calidad, mientras que los más cercanos a 100 son indicativos de la mejor calidad.

Su alta densidad, el valor bajo al impacto, la resistencia a la compresión, así como el buen pulido y la resistencia a los ciclos de hielo/deshielo, hacen a la escoria negra apta para su uso como zahorra, según las indicaciones.

- **Catálogo de residuos CEDEX**

En relación con la utilización de escoria negra en firmes de carreteras, el *Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción "Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico"* de 2013 publicado por el CEDEX, indica lo siguiente:

*Las escorias negras, adecuadamente tratadas, cumplen las especificaciones técnicas que exigen los pliegos de carreteras para áridos de capas granulares en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras.*

---

<sup>72</sup> California Bearing Ratio: Ensayo que tiene como objetivo determinar la capacidad portante de un suelo en función de su estado, densidad y humedad, así como de la sobrecarga que se le aplique.

Tienen latente el riesgo de expansión y de hinchamiento, por lo que es importante evaluar su potencial expansivo y limitar su uso cuando sobrepase los valores establecidos. Debido a su porosidad, su angulosidad, y a la falta de fino, las escorias pueden resultar incómodas de extender y compactar, por lo que suelen combinarse con otros áridos para mejorar estos aspectos.

También se indica que las normas europeas armonizadas UNE EN 13043<sup>73</sup> y UNE EN 13242<sup>74</sup> hacen mención expresa a la utilización de áridos procedentes de las escorias de acería de horno eléctrico. En ambas normas se indica que se debe controlar la estabilidad de volumen de estos áridos, de acuerdo con el ensayo recogido en la norma europea EN 1744-1 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos y se establecen distintas categorías. En los anexos de Control de producción en fábrica, se establecen las frecuencias mínimas de ensayo para determinar la estabilidad en volumen de los áridos siderúrgicos de acería. También se hace referencia a este tipo de áridos en el anexo ZA (informativo), en los que se recogen los campos de aplicación de los productos y los requisitos aplicables.

○ **Libro Blanco del País Vasco**

El Libro Blanco del País Vasco<sup>75</sup> de 1999 indica que las escorias de acería apuntan a cumplir con creces, tras un tratamiento adecuado, todas las especificaciones que exigen los pliegos de carreteras, teniendo latente el riesgo de expansión y de hinchamiento que puede existir, y propone como método para su evaluación el “test” de hinchamiento acelerado descrito por la norma americana ASTM-D-4792<sup>76</sup>, que clasifica como apta una escoria siempre y cuando el hinchamiento que presente sea inferior a 0,5%. En caso de que la escoria supere el valor de 0,5% se podría conseguir que el hinchamiento sea inferior sometiendo a la escoria a periodos de envejecimiento superiores para conseguir una hidratación que inerte la escoria y, por lo tanto, disminuya el hinchamiento.

**Tabla 5.1.4.1.1-1. Condiciones reciclaje escorias acería, Libro Blanco del País Vasco.**

| Vía reciclaje                            | Limitaciones Medioambientales   | Limitaciones técnicas | Pretratamientos necesarios                                    |
|--|---|-----------------------|---|
| Explanada, bases y subbases de carretera | Contenido Ba, Cd, Cr, Mo, Ni, Pb, Se, V, Zn, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , F <sup>-</sup><br>Espesor máximo: 0,7 m. | Hinchamiento <0,5%    | Separación de la fracción metálica, machaqueo y clasificación |

Así mismo, el uso de la escoria de horno de acero en la construcción de carreteras es una de las aplicaciones previstas en el documento BAT de la producción del hierro y el acero<sup>77</sup>, en el documento BREF de la forja y

<sup>73</sup> UNE-EN 13043:2002/AC:2004. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas

<sup>74</sup> UNE-EN 13242:2003+A1:2008. Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes

<sup>75</sup> *Departamento de Ordenación del Territorio Vivienda y Medio Ambiente. Gobierno Vasco. Libro Blanco Para la Minimización de Residuos y Emisiones. Escorias de Acerías. 1999.*

<sup>76</sup> *ASTM D4792/D4792M-13:2019. Standard Test Method for Potencial Expansion of Aggregates from Hydration Reactions.*

<sup>77</sup> *European Commission. Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel. 2001.*

fundición<sup>78</sup> para la reutilización externa de los residuos sólidos generados por las fundiciones, así como en las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) en la producción siderúrgica<sup>79</sup>.

- **Nota Técnica del MITMA 03/2020<sup>80</sup>**

La Nota Técnica aclara la interpretación sobre el uso de áridos siderúrgicos, entre los que se encuentran las escorias negras, y proporciona algunas directrices técnicas sobre el empleo de este material, en especial en el campo de las mezclas bituminosas, pero también en ciertas aplicaciones no ligadas en la construcción de carreteras.

En la nota se señala que las escorias negras, adecuadamente tratadas, cumplen generalmente las especificaciones técnicas que exigen los pliegos de carreteras para áridos de capas granulares en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras. Presentan un riesgo latente de expansión y de hinchamiento, por lo que resulta muy importante evaluar su potencial expansivo y limitar su uso cuando se sobrepasen los valores establecidos. Debido a su **porosidad, su angulosidad y a la falta de finos**, las escorias pueden resultar incómodas de extender y compactar, por lo que **suelen combinarse con otros áridos para mejorar estos aspectos**.

Desde el punto de vista medioambiental, se indica que es preciso comprobar que los resultados del ensayo de lixiviación sobre las escorias permanezcan por debajo de los límites fijados. Los lixiviados de las escorias, en especial de aquellas que no hayan sido envejecidas, pueden presentar problemas debido fundamentalmente a los altos valores de pH y a la presencia de cantidades significativas de metales pesados.

Apunta que, a pesar de lo indicado en el *artículo 510. Zahorras* del PG-3, en relación al periodo mínimo de envejecimiento con agua de tres meses, se ha observado que este aspecto no es relevante y que el periodo necesario vendrá establecido por los resultados de los ensayos de expansión.

Se indica también que está expresamente prohibida la mezcla de escorias negras y blancas para su empleo como material granular en cualquiera de los elementos que constituyen la estructura de un firme de carreteras. La detección de la presencia de escoria blanca en cualquier lote suministrado a la obra debe suponer el rechazo de todo el material de la misma procedencia, así como del suministrador de este material.

Por último, para cualquiera de los posibles empleos contemplados en el PG-3 es preceptivo que el árido siderúrgico esté en posesión del marcado CE correspondiente.

---

<sup>78</sup> Documento BREF. *Mejores Técnicas Disponibles de Referencia Europea. Forja y Fundición. 2009.*

<sup>79</sup> *Decisión de Ejecución de la Comisión, de 28 de febrero de 2012, por la que se establecen las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) en la producción siderúrgica conforme a la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre las emisiones industriales.*

<sup>80</sup> *Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.*

b) Balastos y sub-balastos de vías férreas

Según indica UNESID las escorias negras adecuadamente acondicionadas se puede utilizar como áridos para su uso en la construcción de vías de ferrocarril, denominados balastos y sub-balastos.

Distintos documentos identificados<sup>81,82,83,84</sup> corroboran que la escoria negra puede utilizarse para tal fin incorporando los cambios oportunos en los procesos de machaqueo y cribado, siendo mayoritariamente conforme con las especificaciones del pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios<sup>85</sup>, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Aunque la resistencia a la fragmentación (coeficiente de Los Ángeles) del balasto permite clasificarlo como tipos 2 y 3 (vías AVE < 200 km/h y secundarias) el resultado de desgaste obtenido no alcanza el valor exigido para para vías AVE  $\geq$  200 km/h.
- Si bien no es exigible en todas las obras, de cara a garantizar la conformidad del sub-balasto con los requisitos de permeabilidad al agua, sería necesario añadir una mayor proporción de arenas y finos a la mezcla pudiendo incluso plantearse la posibilidad de adicionar arena natural en caso de ser necesario.
- Desde el punto de vista ambiental, debe prestarse especial atención a la lixiviación que presentan las escorias para el vanadio y selenio. Los procesos de preparación de la escoria deberían dirigirse a minimizar esta lixiviación. Los lixiviados pueden presentar altos valores de pH representando esto un potencial impacto para el medio ambiente.

5.1.4.2 Uso como árido. Aplicaciones ligadas de la escoria negra

Las aplicaciones ligadas son aquellas en las cuales los materiales granulares se mezclan con conglomerantes (cemento, betún o cualquier otro conglomerante hidráulico, hidráulico-puzolánico o aéreo) que confieren cohesión al conjunto.

Según la documentación facilitada por UNESID, la escoria negra puede utilizarse como árido ligado en sustitución de áridos naturales o reciclados principalmente en mezclas bituminosas, hormigones prefabricados, gravacimientos y morteros. Pueden utilizarse individualmente o en combinación con áridos naturales, para el ajuste granulométrico requerido.

---

<sup>81</sup> IHOBE, Gobierno Vasco y Fondo Europeo de Desarrollo Regional. *Iniciativas Empresariales de Economía Circular en el País Vasco. Descripción de 36 proyectos. Febrero 2017.*

<sup>82</sup> J. Roca Guitart. *Interés Técnico-Económico del Uso de Escoria en el Ámbito Ferroviario. Escuela de Caminos. Universidad Politécnica de Cataluña. Octubre 2012.*

<sup>83</sup> Gain: *Escorias en Capas de Asiento Ferroviarias. LIFE12 ENV/ES/000638. Informe de Layman. 2014.*

<sup>84</sup> M. Morata, C. Saborido & V. Fontseré. *Slag Aggregates for Railway Track Bed Layers: Monitoring and Maintenance. 2016.*

<sup>85</sup> Orden FOM/1269/2006, de 17 de abril, por la que se aprueban los Capítulos: 6.-Balasto y 7.-Subbalasto del pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios (PF).



a) Mezclas bituminosas

Los procesos para la fabricación de mezclas bituminosas pueden ser de dos tipos, en función de su temperatura de puesta en obra.

o Mezclas bituminosas en caliente

Se define como mezcla bituminosa en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado (betún), áridos finos y gruesos y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante.

El proceso de fabricación y ejecución de mezclas bituminosas incluye el estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo, la propia fabricación de acuerdo a la fórmula (que comprende a su vez etapas como la alimentación y dosificación del árido frío, el secado y calentamiento del árido, el cribado y almacenamiento del árido caliente, la alimentación y calefacción del ligante y la mezcla), la descarga y el transporte de la mezcla, la preparación de la superficie y la extensión y compactación de la mezcla.

Dentro de este tipo de mezclas se distinguen las mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso, empleadas habitualmente en las capas inferiores del pavimento como capas base y capas intermedias, y las mezclas bituminosas para capas de rodadura, empleadas en la capa superior del pavimento soportando directamente las solicitaciones del tráfico.

o Mezclas bituminosas en frío

Son aquellas mezclas bituminosas con consistencia adecuada para su puesta en obra directa e inmediata, y que se fabrican a temperatura ambiente mediante emulsión bituminosa, áridos, agua y, eventualmente, polvo mineral de aportación y aditivos. Se diferencian de las mezclas bituminosas en caliente básicamente en que no es preciso calentar previamente los áridos, y que al extenderse y compactarse a la temperatura ambiente el ligante debe ser líquido a dicha temperatura por lo que debe estar fluidificado o emulsionado.

Se utilizan principalmente para aplicaciones de mezclas bituminosas de menor envergadura, en una o dos capas, y para mejora y conservación de pavimentos.

Cabe señalar también la existencia de tratamientos superficiales mediante riesgos con gravilla. Estos tratamientos superficiales tienen por objeto proporcionar una textura adecuada para la circulación de los vehículos e impermeabilizar el firme, sin que aporten directamente un incremento en la capacidad estructural. Estos tratamientos se aplican sobre la capa bituminosa fresca del firme, tanto en la calzada como en arcenes, situándose por tanto en la parte más superficial del firme de carreteras.

b) Hormigón y prefabricados de hormigón

El hormigón es un compuesto formado a partir de la mezcla de grava, gravilla y arena, de tamaño máximo limitado, que cumplen ciertas condiciones en cuanto a sus características mecánicas, químicas y granulométricas, unidas entre sí por una pasta aglomerante hidráulica formada por un conglomerante (cemento) y agua.

A este material básico y en el momento de su amasado, pueden añadirse otros productos o materiales para mejorar algunas características determinadas (adiciones y aditivos) como cenizas volantes y humo de sílice, tal y como figura en la *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*.

Los áridos son fundamentales en la fabricación de hormigones debido a su contribución en la estabilidad de volumen, resistencia y economía, no interviniendo en el fraguado y endurecimiento. En el aspecto técnico, los áridos ejercen una influencia muy positiva en la resistencia mecánica, retracción, fluencia, abrasión e incluso durabilidad de los morteros. En la siguiente tabla se presentan las proporciones de materiales que suele tener un hormigón:

**Tabla 5.1.4.2-1. Composición del hormigón.**

| Componentes hormigón              | % en volumen |
|-----------------------------------|--------------|
| Aglomerante (cemento hidráulico)  | 10-15        |
| Áridos granulares                 | 65-75        |
| Agua                              | 15-20        |
| Aire ocluido                      | 1-2          |
| Aditivos y adiciones (eventuales) | variable     |

Como se puede ver en la tabla anterior, un alto porcentaje del volumen de los hormigones está ocupado por los áridos que conforman una estructura granular y que crea huecos que son rellenados por la pasta de cemento manteniéndolos unidos. No deben emplearse áridos activos frente a los componentes del cemento o frente a agentes externos como el agua, aire, hielo, etc.

Los tamaños de los áridos procedentes de la naturaleza y de procesos industriales o reciclados son muy diversos. Las partículas se suelen dividir en dos grupos en función del tamaño límite fijado por la *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*.

- Áridos finos: áridos que pasan por el tamiz 4 mm (arenas).
- Áridos gruesos: fracción de áridos que quedan retenidos por el tamiz 4 mm.

A la hora de la fabricación de morteros y hormigones es muy importante conocer la densidad de los áridos, que depende de los poros que sus partículas contengan y cómo estén conectados entre sí. Otro factor para tener en cuenta en los áridos es la absorción y la porosidad, ya que tiene una gran influencia en la adherencia con la pasta de cemento, y, por consiguiente, en las resistencias mecánicas.

Las distintas aplicaciones pueden agruparse en hormigón estructural (hormigón estructural, hormigón preparado, prefabricados de hormigón, cajones de hormigón para diques portuarios), hormigón no estructural (hormigón de limpieza, hormigón de relleno) y hormigón para carreteras (pavimentos de hormigón, hormigón magro vibrado).

c) Material tratado con cemento o gravacemento

Se denomina grava-cemento a la mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y, eventualmente, adiciones que, convenientemente compactada, se utiliza en la construcción de firmes de carreteras<sup>86</sup>.

El proceso de fabricación de gravacemento comprende las etapas de alimentación y dosificación de los áridos, el mezclado de éstos con el cemento, el agua y los aditivos, el amasado de la mezcla, el transporte y distribución y la puesta en obra.

d) Mortero

Los morteros son mezclas plásticas obtenidas con un aglomerante, arena y agua. A diferencia del hormigón, los morteros no se componen de partículas de gran tamaño, como la grava. Se denominan según sea el aglomerante. Así se tienen morteros de yeso, de cal o de cemento<sup>87</sup>.

El proceso de fabricación se divide en distintas etapas como la dosificación y alimentación de los áridos, el mezclado de los componentes, el transporte y distribución y la puesta en obra.

5.1.4.2.1 *Viabilidad técnica de la escoria negra. Aplicaciones ligadas*

a) Mezclas bituminosas

o **Documentación facilitada por UNESID**

Según indicaciones de UNESID, la escoria negra debidamente acondicionada, puede utilizarse como árido para mezclas bituminosas siguiendo los mismos procesos que para la fabricación de las mezclas convencionales, también en su puesta en obra. Las mezclas pueden ser empleadas en capas base, intermedia y de rodadura de firmes, así como para tratamientos de mejora y conservación de pavimentos.

La escoria presentaría buena adhesión al betún debido a su alto carácter alcalino y a su porosidad. Además, el uso frente a los áridos convencionales supone ventajas en cuanto al enfriamiento de la capa asfáltica y para los viales en los que existe un alto desgaste y se requiere una resistencia óptima al deslizamiento. Si bien, debido a su elevada densidad y su mayor absorción, la composición volumétrica entre ligante y árido varía en comparación con los áridos convencionales.

o **Catálogo de residuos CEDEX**

*El Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción "Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico" de 2013 publicado por el CEDEX, indica lo siguiente:*

*Las escorias negras, adecuadamente tratadas, cumplen las especificaciones técnicas que exigen los pliegos de carreteras para áridos de capas granulares en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras.*

---

<sup>86</sup> *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).*

<sup>87</sup> *Cátedra de Ingeniería Rural. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Sin fecha.*

Tienen latente el riesgo de expansión y de hinchamiento, por lo que es importante evaluar su potencial expansivo y limitar su uso cuando sobrepase los valores establecidos. Debido a su porosidad, su angulosidad, y a la falta de fino, las escorias pueden resultar incómodas de extender y compactar, por lo que suelen combinarse con otros áridos para mejorar estos aspectos.

No deben utilizarse nunca en capas estabilizadas con cemento o junto a obra de fábrica u otros elementos que restrinjan las posibles expansiones.

- Se ha comprobado que un adecuado tratamiento, y una clasificación y selección de las escorias en la planta, pueden proporcionar sin problemas áridos de calidad para ser utilizados en mezclas bituminosas. Estos áridos poseen un buen coeficiente de Los Ángeles y un excelente coeficiente de pulimento acelerado, que los hace especialmente utilizables en capas de rodadura. La composición química y el carácter básico de las escorias garantiza una buena adhesividad con los betunes convencionales. El principal problema que se plantea en la fabricación de mezclas con estos áridos es la falta de finos en la fracción más pequeña. Una dosificación de áridos adecuada, desde un punto de vista técnico, es la que combina árido grueso escoria y árido fino calizo.

- **Libro Blanco del País Vasco**

Así mismo, el Libro Blanco del País Vasco<sup>88</sup> señala que las escorias de acería apuntan a cumplir con creces, tras un tratamiento adecuado, todas las especificaciones que exigen los pliegos de carreteras, pero está latente el riesgo de expansión y de hinchamiento que puede existir.

Entre las alternativas de valorización cuya validez técnica, económica y medioambiental ha sido confirmada por experiencias a gran escala en la Comunidad Autónoma del País Vasco se encuentra su utilización como capa de rodadura.

**Tabla 5.1.4.2.1-1. Condiciones reciclaje escorias acería, Libro Blanco del País Vasco.**

| Vía reciclaje    | Limitaciones Medioambientales | Limitaciones técnicas | Pretratamientos necesarios                                    |
|------------------|-------------------------------|-----------------------|---|
| Capa de rodadura | Contenido Cd, Se              | Hinchamiento < 0,5%   | Separación de la fracción metálica, machaqueo y clasificación |

- **Nota Técnica del MITMA 03/2020<sup>89</sup>**

Según la Nota Técnica la experiencia acumulada ha permitido acreditar un excelente comportamiento del árido siderúrgico, especialmente en capas de rodadura e intermedia y la ausencia de problemas de durabilidad, debido a sus características mecánicas y de su afinidad a los ligantes bituminosos. En particular,

<sup>88</sup> Departamento de Ordenación del Territorio Vivienda y Medio Ambiente. Gobierno Vasco. Libro Blanco Para la Minimización de Residuos y Emisiones. Escorias de Acerías. 1999.

<sup>89</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

las mezclas bituminosas para capas de rodadura elaboradas con este tipo de árido artificial ofrecen superficies con elevados niveles de adherencia. Se diseñan del mismo modo que el resto de las mezclas y no presentan problemas para cumplir las especificaciones.

La mayor parte de los inconvenientes asociados a su utilización (riesgos de expansión, mayor densidad, absorción, contenido de ligante) pueden atenuarse o eliminarse por completo adoptando las precauciones necesarias durante su producción (forma de enfriamiento y tratamiento, por ejemplo), mediante un cuidadoso diseño de mezclas, o ajustando oportunamente los procedimientos de fabricación y puesta en obra.

Las escorias negras son las de mayor dureza, densidad, resistencia a la abrasión y desgaste, lo que las hace muy adecuadas para su uso en la fabricación de mezclas bituminosas, compensando las desventajas de su mayor densidad (3,3 t/m<sup>3</sup> - 3,7 t/m<sup>3</sup>). La absorción de agua de la escoria negra suele estar comprendida entre 1% - 4% en volumen. Las partículas son duras, con coeficientes de desgaste Los Ángeles entre 15% - 25%, y con un coeficiente de pulimento acelerado (PSV) comprendido entre 0,50 y 0,60 lo que las hace aptas para mezclas bituminosas en capas de rodadura.

En la fabricación de mezclas con estos áridos se plantea el problema de la falta de finos en la fracción más pequeña. Una dosificación de áridos adecuada, desde un punto de vista técnico, es la que combina árido grueso siderúrgico y árido fino calizo.

El contenido de humedad del árido siderúrgico suele ser superior al del árido natural, por esta razón, es importante cuidar que desde la instalación de tratamiento hasta la central de fabricación se transporten los áridos lo más secos posible. Siempre que sea posible, es recomendable apartar las fracciones con humedad excesiva (> 5%), reservándolas hasta que su secado a la intemperie reduzca su contenido de agua tanto como sea posible, para no incrementar la demanda energética de la central de fabricación y para prevenir la existencia de humedad residual en la mezcla bituminosa.

Las aplicaciones en las que puede resultar más beneficioso el uso de árido siderúrgico en mezclas bituminosas son capas de rodadura en vías de alta intensidad de tráfico, capas intermedias más rígidas, mezclas bituminosas sono-reductoras y reparaciones.

Para cualquiera de los posibles empleos contemplados en el PG-3, la Nota Técnica señala que es preceptivo que el árido siderúrgico esté en posesión del marcado CE correspondiente.

- b) Árido en hormigón
  - o **Catálogo de residuos CEDEX**

*El Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción "Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico" de 2013 publicado por el CEDEX considera como una alternativa de valorización de la escoria negra su utilización como árido de hormigón ya que pueden cumplir, tras un tratamiento adecuado, las especificaciones de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08).*

Así mismo señala que, experimentalmente se ha observado que, tras un proceso de machaqueo, el árido grueso procedente de la escoria negra puede ajustarse de forma satisfactoria a las granulometrías requeridas en la norma americana ASTM C33<sup>90</sup> (tamaño máximo de 25 mm). Sin embargo, este ajuste no es tan fácil de conseguir para el caso del árido fino, siendo preciso llevar a cabo un proceso especial de triturado que resulta caro y poco efectivo, existiendo siempre un déficit notable de aquellos tamaños de partícula que pasan por los tamices menores. Es éste un problema importante que deberá tenerse en cuenta en la producción de morteros y hormigones, pudiéndose solventar en las dosificaciones utilizando un árido fino adecuado por mezcla de escorias con filler, en una proporción que deberá ser estudiada para cada caso concreto, tal y como se aprecia en la siguiente tabla:

**Tabla 5.1.4.2.1-2. Combinación experimental. CEDEX.**

| Tamiz (mm) | Escoria (% pasa) | Filler calizo (% pasa) |
|------------|------------------|------------------------|
| 9,52       | 100              | 100                    |
| 4,76       | 99,6             | 100                    |
| 2,38       | 57,9             | 100                    |
| 2,00       | 46,2             | 100                    |
| 1,19       | 22,7             | 84                     |
| 0,59       | 5,9              | 62                     |
| 0,42       | 4,8              | 51                     |
| 0,30       | 2,8              | 43                     |
| 0,15       | 1,3              | 32                     |
| 0,075      | 0,6              | 21                     |

De acuerdo con recomendaciones basadas en ensayos internacionales, se puede utilizar hasta un 100% de árido grueso de escorias, en cuyo caso el porcentaje de árido fino de escorias se limita al 30% (relativo al volumen total de árido fino). Si el árido grueso es natural, el porcentaje de árido fino de escorias puede ascender al 50%. Para porcentajes mayores, se requiere la realización de estudios específicos. Quedan excluidas las aplicaciones en hormigones de resistencia superior a 60 N/mm<sup>2</sup> y hormigones pretensados.

Por otra parte, en los ensayos realizados en los que se reemplazó la totalidad de la arena por escorias negras de horno de arco eléctrico, se obtuvieron hormigones de mayor densidad (2.770 kg/m<sup>3</sup>), con una resistencia a compresión y carga de rotura similares a los de un hormigón con arena natural y de mayor fragilidad. La resistencia del hormigón con escorias suele ser inferior a la de un hormigón convencional a edades tempranas (hasta 3 días), aunque posteriormente, se puede obtener una resistencia similar o incluso ligeramente superior a la del hormigón convencional.

En cuanto a las características de los hormigones con escorias de acería presentan una mayor demanda de agua para obtener una determinada consistencia, tanto mayor cuanto mayor es el contenido de escorias utilizadas. Este tipo de hormigones suele presentar además una menor retracción. Se deben utilizar aditivos aireantes para obtener un adecuado comportamiento de durabilidad frente a los ciclos hielo-deshielo.

<sup>90</sup> ASTM C33-3. *Standard Specification for Concrete Aggregates.*

Debido al bajo contenido de sílice que presentan las escorias de acería, el riesgo de que se presenten fenómenos de reacción álcali-árido es muy reducido.

En cuanto al transporte y la distribución se debe realizar siguiendo los procedimientos adecuados, no pudiendo superar la hora y media entre la adición de agua del amasado y la colocación del hormigón, salvo que se utilicen aditivos retardantes del fraguado<sup>91</sup>.

c) Material tratado con cemento o gravacemento

Tal y como indica UNESID, la escoria negra, adecuadamente acondicionada, puede ser utilizada como árido para gravacemento siguiendo los mismos procesos que para la fabricación a partir de áridos convencionales.

Sin embargo, cabe señalar que el *Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción "Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico"* del CEDEX indica que las escorias negras no deben utilizarse nunca en capas estabilizadas con cemento o junto a obra de fábrica u otros elementos que restrinjan las posibles expansiones, argumento y posición que comparte la Nota Técnica del MITMA 03/2020<sup>92</sup> sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos.

d) Mortero

o **Catálogo de residuos CEDEX**

El catálogo citado anteriormente señala que, en la fabricación de morteros, la escoria negra necesita una molienda previa para obtener una granulometría similar a la de un árido convencional. Con este tratamiento, se puede conseguir un material con un huso granulométrico dentro del especificado en los límites que recoge la Norma Básica de la Edificación NBE FL-90<sup>93</sup> y que presenta un contenido de finos muy reducido, inferior al 3%. Según este estudio, los morteros estudiados (con distintos porcentajes de escorias), presentan una buena resistencia a compresión, siendo los porcentajes óptimos de escorias los situados alrededor del 30-40%.

#### 5.1.4.3 Otros usos: como materia prima en la fabricación de productos de construcción

##### Fabricación de clínker

En la ficha técnica de las escorias de acería, publicada en 2011 por el CEDEX, se incluye el reciclaje de las escorias negras en cementeras como aporte de hierro, silicio y cal al horno rotativo en el proceso de fabricación del clínker (como experiencia piloto). La dosificación adecuada del material en base a la composición química se estima aproximadamente en un 4%, para obtener un producto final de

---

<sup>91</sup> Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID).

<sup>92</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

<sup>93</sup> Norma Básica de la Edificación NBE FL-90: «Muros resistentes de fábrica de ladrillo».

características iguales al obtenido con la utilización de materia prima convencional, sin que aparezcan problemas de calidad técnica del producto final (IHOBE, 1999).

No obstante, en otros estudios se puntualiza que se han obtenido cementos con un contenido de escorias entre el 15-30% que pueden cumplir los requisitos establecidos para los cementos de categoría resistente 42,5, mientras que con un contenido de escorias del 45% pueden satisfacer los requisitos establecidos para los cementos de categoría resistente 32,5. Estos cementos presentan una menor demanda de agua, por lo que mejora su trabajabilidad, aunque presentan un mayor tiempo de fraguado. Así mismo podría pensarse en la utilización de estas escorias como adición en mezclas con cementos para fabricación de hormigones y otros derivados, para lo cual como punto de partida podrían tomarse como referencia las especificaciones pedidas a otras adiciones.

### **Conclusiones. Viabilidad técnica de la escoria negra**

En cuanto al uso como árido en aplicaciones no ligadas, la escoria negra puede utilizarse, según los documentos de referencia, en el proceso de elaboración de áridos, principalmente para su uso como zahorra, grava, balasto (sub-balasto) y rellenos.

La viabilidad técnica de la escoria negra de acero como árido alternativo ha sido justificada para la mayor parte de estas aplicaciones a través de estudios técnicos que confirman el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa de aplicación. Pese a que el uso de la escoria tratada como árido en rellenos y terraplenes no se justifica de manera específica, el Libro Blanco del País Vasco indica que las escorias de acería apuntan a cumplir con creces, tras un tratamiento adecuado, todas las especificaciones que exigen los pliegos de carreteras, por lo que se considera que este uso también es apto.

En el caso del uso como árido en aplicaciones ligadas, los estudios confirman la viabilidad técnica de la escoria negra tratada para su uso como árido en la fabricación de hormigones, siempre que se alcance una determinada finura de tamaño de grano a través de una adecuada molienda y/o mediante la adición de árido fino calizo. En este caso, se puede utilizar hasta un 100% de árido grueso de escorias, en cuyo caso el porcentaje de árido fino de escorias se limita al 30% (relativo al volumen total de árido fino). Si el árido grueso es natural, el porcentaje de árido fino de escorias puede ascender al 50%.

El MITMA a través de la nota técnica 03/2020 confirma el buen comportamiento de las escorias negras como árido en capas de rodadura para mezclas bituminosas, si bien recomienda adicionar árido fino calizo para solventar el problema de la falta de finos en las escorias negras.

Finalmente, el CEDEX y el MITMA a través de la nota técnica 03/2020 no recomienda el uso de las escorias negras en capas estabilizadas con cemento (gravacemento) o junto a obra de fábrica u otros elementos que restrinjan las posibles expansiones.

Uno de los parámetros clave a controlar es el contenido de compuestos potencialmente expansivos, CaO y MgO libres, presentes en las escorias de acería ya que pueden implicar fenómenos de inestabilidad de volumen a corto y medio-largo plazo, respectivamente.



En las escorias negras se dan valores de expansión variables, de entre <0,5 al 1,5%, en función de los tipos de acero. No obstante, los resultados analíticos confirman que el proceso de estabilización produce una reducción en los contenidos de los compuestos expansivos presentes en las escorias (sulfatos y magnesia libre) y la total desaparición de la cal libre, debido a su alta solubilidad en agua.

En las siguientes tablas se resumen la información disponible para cada una de las posibles aplicaciones de las escorias de acero al carbono tratadas, señalando aquellas aplicaciones justificadas por estudios técnicos, los posibles usos finales de cada aplicación y las posibles limitaciones de viabilidad.

**Tabla 5.1.4-1. Uso como árido en plicaciones no ligadas. Escoria negra.**

| Aplicación y normativa de referencia                             | Estudio técnico | Destinos   | Limitaciones a su viabilidad   |
|--|-----------------|--|--|
| Zahorra. PG-3 Art. 510   | Sí              | Construcción de firmes de carreteras: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ En construcción de firmes (base, subbase, explanada mejorada)</li> <li>○ Como material granular para base/subbase de vías peatonales, ciclistas y pistas deportivas</li> </ul> Como material para explanada mejorada. | Expansividad <5% (UNE-EN 1744-1)<br>Índice granulométrico de envejecimiento <1% (NLT-361)<br>Cal libre < 5‰<br>Hinchamiento < 0,5% |
| Relleno localizado. PG-3 Art. 332                                | No              | Rellenos localizados o asimilables a terraplén bajo cobertura (rellenos, nivelación de terrenos, coronaciones y zonas en talud (espaldones).<br>Rellenos localizados bajo cobertura. Proyectos de urbanización (zanjas, cubrición tuberías, encachados, trasdós).                                    | -  |
| Terraplenes. PG-3 Art. 330                                       | No              | Rellenos asimilables a terraplén.<br>Terraplenes, excepto zonas expuestas de talud.  |  |
| Balasto <sup>94</sup> y sub-balasto de vías férreas. PF-6 y PF-7 | Sí              | Sub-balasto de vías férreas.   | Granulometría: Puede ser necesario adicionar finos.  |
| Rellenos en vertederos   | No              | Capa para el sellado de vertederos y pistas provisionales en su interior   | -  |

<sup>94</sup> No se ha contemplado el uso de la escoria como balasto, teniendo en cuenta el criterio seguido en las CCAA y a nivel europeo, por no presentar esta aplicación una capa impermeable o no totalmente impermeable.

**Tabla 5.1.4-2. Uso como árido en aplicaciones ligadas**

| Aplicación y normativa de referencia                         | Estudio técnico | Destinos   | Limitaciones a su viabilidad  |
|--|-----------------|--|---|
| <b>Escoria negra</b>   |                 |  |   |
| Fabricación de cemento y morteros                            | Sí              | Morteros   | Granulometría: Puede ser necesario adicionar finos o adecuada molienda.<br>Como material puzolánico en la fabricación de cemento hasta un 30 %.   |
| Material tratado con cemento<br>Gravacemento<br>PG-3 Art.513 | No              | Material tratado con cemento (gravacemento)  | Control de la expansividad.<br>Según CEDEX y la NT 03/2020 las escorias negras <b>no deben utilizarse nunca en capas estabilizadas con cemento</b> o junto a obra de fábrica u otros elementos que restrinjan las posibles expansiones.   |
| Mezclas bituminosas<br>PG-3 Art.540                          | Sí              | Mezclas bituminosas  | Granulometría: Puede ser necesario adicionar finos.<br>Hinchamiento < 0,5%.<br>Según NT 03 03/2020 debe controlarse: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Expansión &lt;3,5% en volumen (UNE EN 13043<sup>95</sup>)</li> <li>• Densidad aparente &lt;10% (&lt;7,5% en la mezcla)</li> <li>• Informar sobre densidad relativa y absorción (UNE-EN 1097-6)</li> </ul> |
| Fabricación de hormigón<br>EHE-08                            | Sí              | Hormigón estructural (estructural, preparado, prefabricados, cajones para diques).<br>Hormigón no estructural (de limpieza, de relleno).<br>Hormigón para carreteras (pavimentos de hormigón, magro vibrado) | Granulometría: Puede ser necesario adicionar finos.<br><br>Pueden quedar excluidas las aplicaciones en hormigones de resistencia superior a 60 N/mm <sup>2</sup> y hormigones pretensados.  |

**Tabla 5.1.4-3. Uso como materia prima en la fabricación de productos de construcción**

| Aplicación                                     | Estudio técnico | Destinos                            | Limitaciones a su viabilidad   |
|--|-----------------|-------------------------------------|--|
| Fabricación de clínker: escoria negra y blanca | Sí              | Fabricación de clínker en cementera | Contenido en fluoruros<br>Control expansividad: <5% MgO<br>Dosificaciones por lo general hasta 5% de escoria blanca pudiendo alcanzar un 15%.<br>Granulometría uniforme <50 mm |

<sup>95</sup> UNE-EN 13043:2003 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.

### 5.1.5 Consideraciones ambientales y sobre la salud humana

La escoria negra se encuentra registrada<sup>96</sup> bajo el *Reglamento (CE) nº 1907/2006 (REACH)*. Sus códigos de identificación son los siguientes:

**Tabla 5.1.5-1. Códigos de identificación de la escoria negra.**

| Nombre        | NºCAS      | NºEC      | Nº REGISTRO REACH     |
|---------------|------------|-----------|-----------------------|
| Escoria negra | 91722-10-0 | 932-275-6 | 01-2119485979-09-0078 |

UNESID apunta que la escoria negra además de cumplir con los requisitos del proceso de registro conforme al *Reglamento REACH*, el material no cumple con los criterios para ser clasificado como peligroso conforme al *Reglamento (CE) nº 1272/2008 sobre la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP)*. En la misma línea se encuentra el Catálogo Europeo de Residuos (CER), que clasifica a las escorias de acería de horno eléctrico como residuos no tóxicos ni peligrosos bajo los códigos 10 02 01 y 10 02 02.

#### 5.1.5.1 Uso como árido en aplicaciones no ligadas.

- **Resultados analíticos sobre el lixiviado**

Tal y como se ha analizado anteriormente, la escoria negra posee un gran contenido en hierro, manganeso, aluminio, magnesio y titanio procedente de sus componentes principales. También se evidencia una notable presencia de bario, boro, cobre, vanadio, zinc, cromo y azufre entre sus componentes minoritarios.

No obstante, al tratarse de un residuo sólido y debido a sus características físicas y químicas, está técnicamente confirmado que la lixiviación es el principal sistema potencial de emisión contaminante, es decir, la emisión de los componentes presentes en la escoria hacia los suelos, aguas superficiales y subterráneas. Los metales pesados se encuentran incluidos en la estructura de la escoria y pueden ser liberados al medio en cierta medida, en condiciones concretas de humedad y pH. Además de la lixiviación de los metales pesados, otros compuestos como sulfatos, fluoruros, cloruros, y fenoles deben ser monitorizados dependiendo de los requisitos de la normativa aplicable en cada caso.

Se ha tenido acceso a distintos resultados analíticos sobre el lixiviado de la escoria negra procedentes de diferentes ensayos y empresas productoras de acero en España, cuyos resultados se muestran a continuación indicando entre paréntesis el año de su realización:

---

<sup>96</sup> <https://echa.europa.eu/es/registration-dossier/-/registered-dossier/16150>

Tabla 5.1.5.1-1. Lixiviado de la escoria negra (mg/kg) según UNE-EN 12457-3:2003 (L/S=10 L/Kg).

| Parámetro         | Resultado analítico. Empresa 1 (2017) | Resultado analítico. Empresa 2 (2017) | Resultado analítico. Empresa 3 (2018) | Resultado analítico. Empresa 4 (2018) | Resultado analítico. Empresa 5 (2016) | Resultado analítico. Empresa 6 (2015) | Resultado analítico. Empresa 7 (2017) | Resultado analítico. Empresa 8 (2017) |
|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| pH                | -                                     | -                                     | 11,57                                 | -                                     | -                                     | 11,65                                 | -                                     | 11,5                                  |
| Arsénico          | <0,2                                  | <0,02                                 | <0,05                                 | <0,01                                 | -                                     | <0,05                                 | -                                     | -                                     |
| Bario             | <5                                    | 0,79                                  | 5,58                                  | 1                                     | 2,1                                   | 7,6                                   | 3,9                                   | 6,1                                   |
| Cadmio            | <0,02                                 | <0,01                                 | <0,0005                               | <0,005                                | <0,005                                | <0,025                                | <0,009                                | <0,005                                |
| Cromo total       | <0,2                                  | 0,1                                   | <0,01                                 | <0,07                                 | <0,2                                  | <0,1                                  | <1                                    | <0,1                                  |
| Cobre             | <0,2                                  | <0,17                                 | <0,05                                 | <0,02                                 | -                                     | <0,1                                  | -                                     | -                                     |
| Mercurio          | <0,01                                 | <0,002                                | <0,01                                 | <0,01                                 | -                                     | <b>0,03</b>                           | -                                     | -                                     |
| Molibdeno         | <0,5                                  | <0,02                                 | 0,08                                  | 0,1                                   | <0,27                                 | <b>16,1</b>                           | <b>1,2</b>                            | <b>1,04</b>                           |
| Níquel            | <0,2                                  | <0,08                                 | <0,01                                 | <0,025                                | <0,2                                  | <0,1                                  | <0,8                                  | <0,1                                  |
| Plomo             | <0,2                                  | <0,12                                 | <0,005                                | 0,1                                   | <0,2                                  | <0,1                                  | <0,8                                  | <0,1                                  |
| Antimonio         | <0,05                                 | <0,01                                 | <0,01                                 | <0,05                                 | -                                     | <0,05                                 | -                                     | -                                     |
| Selenio           | <0,1                                  | <0,1                                  | 0,01                                  | <0,1                                  | <0,043                                | <b>0,13</b>                           | <0,09                                 | 0,07                                  |
| Zinc              | <1                                    | <0,55                                 | 0,09                                  | <0,08                                 | <0,2                                  | 0,764                                 | <0,5                                  | <0,1                                  |
| Vanadio           | -                                     | -                                     | -                                     | -                                     | -                                     | -                                     | 1,3                                   | <0,1                                  |
| Cloruro           | 60-200                                | 53                                    | <20                                   | 98                                    | -                                     | 13,5                                  | -                                     | -                                     |
| Fluoruro          | <13                                   | <1                                    | 7,43                                  | 5,58                                  | <6,4                                  | <5                                    | <b>11</b>                             | <b>11</b>                             |
| Sulfato           | 60-130                                | 197                                   | <20                                   | 272                                   | <69                                   | 166                                   | 218                                   | <50                                   |
| Fenoles lixiviado | -                                     | <1                                    | <0,5                                  | -                                     | -                                     | <0,2                                  | -                                     | -                                     |
| COD lixiviado     | -                                     | <50                                   | <30                                   | <30                                   | -                                     | 79                                    | -                                     | -                                     |
| Sólidos disueltos | -                                     | 2.560                                 | 3.036                                 | 2.879                                 | -                                     | -                                     | -                                     | -                                     |

Tal y como se aprecia en la tabla anterior, la mayoría de los parámetros se encuentran por debajo del límite de cuantificación del laboratorio.

Los valores de concentración de los parámetros detectados en el lixiviado se han comparado con los valores establecidos en las normas autonómicas de valorización de escorias (País Vasco, Cantabria y Cataluña) y Francia al emplear el mismo ensayo de lixiviación, conforme a la norma UNE 12457-4.

También se han comparado con las normas que regulan el uso de las escorias negras en Países Bajos y Flandes, pese a que se basan en un ensayo de percolación en columna. Dado que son ensayos distintos, esta comparación es solamente orientativa.

- **Mercurio:** El valor detectado en el ensayo perteneciente a la empresa 6 (0,03 mg/kg) supera el límite de todas las normas de referencia (0,01 mg/kg en normas autonómicas y 0,02 mg/kg en Países Bajos y Flandes). Se han consultado otras muestras de este mismo productor identificando valores en el lixiviado de mercurio de 0,018 mg/kg.

- **Molibdeno:** Los valores de los ensayos pertenecientes a las empresas 6, 7 y 8 (16,1, 1,2 y 1,04 mg/kg) superan el límite establecido por Francia (0,6 mg/kg), normas autonómicas (0,5 mg/kg).
- **Selenio:** El valor detectado en el ensayo perteneciente a la empresa productora 6 (0,13 mg/kg) supera el límite establecido por Francia, normas autonómicas (0,1 mg/kg). Se han consultado otras muestras de este mismo productor identificando valores en el lixiviado de selenio de 0,01 mg/kg.
- **Fluoruro:** Los valores de los ensayos pertenecientes a las empresas 7 y 8 (11 mg/kg en ambas) superan el límite establecido por Cantabria y Cataluña (10 mg/kg).
- **Guía de Criterios Actualizados para el Empleo de Escoria Negra de Acería de Horno Eléctrico de Arco (HEA), de Acería LD, y de Horno Alto, como Árido para Capas Granulares y Pavimentos de Hormigón en la Construcción de Carreteras. Fundación Tecnalia Research & Innovation. 2018.**

La guía de la Fundación Tecnalia indica lo siguiente: *“el registro de las escorias negras en el Reglamento REACH demuestra su inocuidad en seguridad e higiene ocupacional y ambiental y que su empleo no debe, a priori, representar una potencial afección ambiental si se siguen correctamente las normas y especificaciones técnicas de aplicación”*.

Los metales pesados se encuentran imbuidos en la estructura de la escoria y pueden ser liberados al medio en cierta medida, en condiciones concretas de humedad y pH. Este potencial de liberación de metales es, generalmente, poco relevante en las escorias negras, aunque se trata de un aspecto a considerar en su utilización. Además de la lixiviación de metales pesados, otros compuestos como sulfatos, fluoruros, cloruros y fenoles deben ser monitorizados en función de los requisitos de la normativa aplicable en cada caso.

En aplicaciones no ligadas (bases y subbases granulares, terraplenes, rellenos, etc.) la posibilidad de afección al medio es mayor que en aquellas ligadas, cuya lixiviación es poco relevante. No obstante, indica que, debido al origen industrial y la variabilidad composicional, a su contenido total en metales pesados y al potencial de lixiviación en determinadas circunstancias, con carácter preventivo y con criterios conservadores, el empleo de las escorias en aplicaciones constructivas, como las carreteras, puede estar sujeto a ciertas restricciones que deben ser consideradas.

En determinadas circunstancias más sensibles, como en aplicaciones fuera de los escenarios regulados y áreas con protección a las aguas subterráneas y el medio natural, es práctica común plantear la necesidad de elaborar un Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) que identifique los niveles de riesgo para receptores en el emplazamiento y en el entorno.

- **CEDEX**

El *Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción "Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico"* de 2013 publicado por el CEDEX, indica que, desde el punto de vista medioambiental, las escorias negras de acería se pueden utilizar en capas granulares (como bases, subbases y coronación de explanadas) siempre y cuando los resultados del ensayo de lixiviación permanezcan por debajo de los límites fijados por las regulaciones vigentes a nivel CCAA.

Los lixiviados de las escorias, en especial de aquellas que no hayan sido envejecidas, pueden presentar problemas debido fundamentalmente a los altos valores de pH y a la presencia de cantidades significativas de metales pesados. Se recomienda especialmente controlar la lixiviación de molibdeno, vanadio, selenio y fluoruros.

Más recientemente, en el año 2018, el CEDEX realizó para la anterior Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) un trabajo consistente en el “Estudio del comportamiento ambiental de los áridos procedentes del reciclado de los residuos de construcción y demolición y de las escorias de acería de horno eléctrico para su utilización en la construcción de firmes de carretera”<sup>97</sup> con el fin de profundizar en el comportamiento ambiental de ambos residuos.

En este estudio se presentan los resultados de los ensayos de lixiviación efectuados según los métodos que se están desarrollando a nivel europeo para caracterizar la liberación de sustancias peligrosas (en este caso, ensayo en columna para materiales granulares<sup>98</sup> con cierta permeabilidad según CEN/TS 16637-3:2016<sup>99</sup>), junto con otro ensayo experimental de campo, puesto en marcha con el objetivo de validar de forma cualitativa los resultados obtenidos con los primeros.

La conclusión a la que se llega es que los ensayos en columna permiten obtener información suficientemente precisa como para establecer una metodología que permita dar unas pautas para aceptar un árido procedente de un residuo como material para la construcción de carreteras.

Así mismo señala que, quizás la principal limitación de los métodos de ensayo aplicados en este trabajo es su duración (el ensayo en columna tiene una duración de entre 15 y 30 días aproximadamente). Es por ello que el estudio propone que pudiera plantearse un sistema de control en dos etapas: una primera destinada a la caracterización del material, para lo que se emplearían los ensayos desarrollados por el CEN/ TC 351 y una segunda etapa de control, para lo que serían suficientes los ensayos por el método de volteo (serie UNE EN 12457).

De manera más específica, se plantea considerar una combinación de ensayos de caracterización del comportamiento del material (por ejemplo, con versiones reducidas del mismo en cuanto a la relación L/S)

---

<sup>97</sup> Antonio Sánchez Trujillano, Laura Parra Ruiz, Julio Termenón Delgado. *Caracterización del comportamiento ambiental de áridos procedentes del reciclado de las escorias de acería de horno eléctrico para su empleo en construcción de carreteras* *Electric Arc Furnace Slags Aggregates Environmental Performance in Road Construction*. 2018. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/1387/1356>. 2018.

<sup>98</sup> Se seleccionó el escenario de uso aplicable a materiales granulares con una conductividad hidráulica suficiente como para que el agua circule a su través, que representaría el empleo de los materiales como zahorra para capa de base en un firme.

<sup>99</sup> prEN 16637-3:2021 Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Part 3: Horizontal up-flow percolation test (ensayo de lixiviación en columna con flujo ascendente). En el ensayo se recogen siete fracciones de lixiviado con las siguientes relaciones líquido/sólido (L/S) acumuladas: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1,0 – 2,0 – 5,0 – 10,0 L/kg.

junto a otros más simples de conformidad (tales como los de la serie UNE-EN 12457), junto con otros ensayos, tales como dependencia de pH, conductividad eléctrica u otros, que puedan proveer suficiente información del comportamiento ambiental del material, permitiendo validar su uso. Un planteamiento de este tipo permitiría, además, disminuir el número y complejidad de los ensayos a realizar en cada material específico.

Por otra parte, el estudio también aclara que, pese a que los resultados obtenidos para las columnas ensayadas se compararon con los límites recogidos en la Decisión del Consejo de 19 de diciembre de 2002 para admisión de residuos en vertederos<sup>100</sup>, se ha de tener en cuenta que **esta comparación es solo orientativa ya que se han obtenido según métodos de ensayos distintos**. En este sentido, se señala que **faltaría efectuar una comparación** entre los resultados obtenidos por el ensayo de columna para la relación líquido sólido de 10 L/kg con los que se obtendrían del ensayo más habitual (UNE-EN 12457-4), que **permitiría definir de forma más precisa las especificaciones y frecuencias de ensayo que se habrían de exigir según los distintos niveles de caracterización**.

Finalmente, el estudio señala que ha de tenerse en cuenta que las concentraciones obtenidas mediante un ensayo de lixiviación, en general no se pueden relacionar directamente con el impacto que dicho material podría producir; sino que estos resultados, junto a otros estudios, deben proporcionar información suficiente para adoptar decisiones respecto a su uso en una escala temporal. La extrapolación de los resultados obtenidos en un ensayo de lixiviación a un escenario específico o a una escala temporal determinada se puede realizar mediante la aplicación de modelos hidrogeológicos más o menos complejos.

Por otra parte, en un estudio<sup>101</sup> desarrollado por el CEDEX en el que se evaluaron las posibilidades de utilización de determinados residuos en terraplenes, se indica que, de las cuatro zonas que constituyen el terraplén (coronación, núcleo, espaldones y cimiento), es el núcleo la que demanda más volumen de material. Las **otras zonas** actúan, en cierto modo, como envoltorio del núcleo, **y en función del tipo de residuo puede ser habitual que, por condicionantes de tipo ambiental, se excluya su uso en las mismas**; salvo que el residuo en cuestión no entrañe riesgos ambientales, y no menoscabe o incluso mejore el comportamiento mecánico.

---

<sup>100</sup> Los valores límite que aparecen en esta norma están calculados como sigue:

- En términos de liberación total para las proporciones entre líquido y sólido (L/S) de 10 L/kg expresados directamente en mg/l para la columna C0 (primer eluato de un ensayo de percolación con una proporción L/S = 0,1 L/kg, método EN 14405).
- Con carácter general, los valores límite de referencia serán los de la columna L/S=10 L/kg, calculados mediante el método de ensayo UNE-EN 12457 Parte 4 (L/S= 10 L/kg, tamaño de las partículas < 10 mm).

<sup>101</sup> *Fernando Pardo de Santayana, Herminia Cano Linares, María Santana Ruiz de Arbulo, Rafael Rodríguez Abad. Estudios sobre utilización de residuos en terraplenes de carreteras. CEDEX. 2020.*

○ **Libro Blanco del País Vasco**

El Libro Blanco del País Vasco señala por su parte que las escorias de acería, utilizadas en explanada, bases y subbases de carretera, desde el punto de vista medioambiental no deben superar los límites de concentración según el ensayo de lixiviación UNE-EN 12457 para sustancias como los metales pesados bario, cadmio, cromo, molibdeno, níquel, plomo, selenio, vanadio y zinc, así como para sulfatos y fluoruros. En este sentido, la Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco IHOBE<sup>102</sup> considera prestar especial atención a la lixiviación que presentan las escorias para el vanadio y selenio.

○ **Otros documentos**

Se han identificado otros documentos<sup>103</sup> que analizan el comportamiento ambiental de las escorias de acero e indican, entre otras consideraciones, que:

- La liberación de los sulfatos disminuye notablemente después de un corto periodo de envejecimiento tanto al aire libre como en condiciones acuosas.
- La capacidad de liberación del bario disminuye con el envejecimiento al aire. En condiciones acuosas el bario se libera constantemente, revelando un bajo potencial de retención.
- El vanadio aumenta su potencial de lixiviación hasta en un 80% después del envejecimiento debido, probablemente, a la neoformación de silicatos de calcio que soportan la mayor parte del vanadio.
- Las fracciones más finas (<2mm) conducen a una mayor liberación de las sustancias investigadas.
- Con el fin de conseguir unas condiciones fiables, tanto desde el punto de vista ambiental como técnico, es indispensable triturar las escorias antes de someterlas al envejecimiento, así como garantizar un tamaño granulométrico similar de la escoria de cara a su análisis.
- Debido a las altas concentraciones en el lixiviado de fluoruros (>10 mg/l) y sulfatos (>1000 mg/l), las escorias no podrían ser clasificadas como residuos inertes según la directiva europea de vertederos, al menos no antes de su envejecimiento.
- Es importante estudiar el comportamiento de las escorias a largo plazo con el fin de identificar posibles escenarios de bioacumulación de elementos.

En relación a la lixiviación de la escoria, la documentación facilitada por UNESID señala entre sus conclusiones que incluso en las peores condiciones, con un pH de 4, la lixiviación de los elementos minoritarios como As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Sb y Zn no es relevante en las escorias ferrosas, entre las que se encuentra la escoria negra.

---

<sup>102</sup> IHOBE, Gobierno Vasco y Fondo Europeo de Desarrollo Regional. *Iniciativas empresariales de economía circular en el País Vasco. Descripción de 36 proyectos. Febrero 2017.*

<sup>103</sup> *Influence of Ageing in the Assessment of Leaching Behaviour of Electric Arc Furnace Slags. Eingereicht an der Technischen Universität Wien. Paul H. Brunner. 2009.*



Por último, el documento del JRC: *Study on methodological aspects regarding limit values for pollutants in aggregates in the context of the development of end-of-waste criteria under the EU Waste Framework Directive* de 2014, considera como parámetros críticos en las escorias de horno de arco eléctrico el molibdeno, el vanadio, el cromo y el bario, por lo que al menos debe incluirse una evaluación de dichas sustancias cuando se pretenden utilizar estos materiales en proyectos de construcción.

#### 5.1.5.2 Uso como árido en aplicaciones ligadas y como materia prima en la fabricación de productos de construcción

Tal y como se ha analizado en el punto anterior, las concentraciones de metales pesados y otros elementos reflejadas en los resultados analíticos del lixiviado facilitados de la escoria negra son inferiores a los valores límite establecidos en la normativa de referencia (excepto en algunos casos para el **mercurio, molibdeno, selenio y fluoruros**).

Cabe esperar que los posibles impactos ambientales derivados del uso de la escoria en aquellas aplicaciones ligadas o cuando se empleen como materia prima en la fabricación de productos de la construcción sean notablemente inferiores a los derivados de su uso en aplicaciones no ligadas, tal y como recoge el *Decreto 64/2019, de 9 de abril* del País Vasco en el que no se citan límites de lixiviación en aquellas aplicaciones ligadas del material (tipo 1) o en el *Decreto 100/2018, de 20 de diciembre*, de Cantabria en el que los límites de lixiviación podrán no ser de aplicación si se utilizan en la fabricación de hormigón o cemento.

Esta afirmación se encuentra en línea con lo señalado por la guía de la Fundación Tecnalia Research & Innovation, citada en el apartado anterior, que indica que el potencial de liberación de metales es generalmente poco relevante en las escorias negras, y menos aún en aplicaciones ligadas como en las mezclas bituminosas.

En esta línea, el *Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción "Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico"* de 2013, publicado por el CEDEX, indica que cuando se utilicen las escorias como áridos en mezclas bituminosas para capas de rodadura de firmes, se deberá comprobar que los resultados del ensayo de lixiviación cumplen las especificaciones fijadas por la normativa vigente de las CCAA, aunque también señala que se ha podido demostrar que el árido siderúrgico en una matriz bituminosa emite solamente una fracción pequeña de elemento lixiviado, satisfaciendo los resultados de las normativas ambientales más exigentes. En cuanto a su uso en hormigones, el catálogo señala que el fenómeno de lixiviación en un hormigón normal y en un hormigón con escorias es similar para todos los metales, excepto para el cloro.

El Libro Blanco del País Vasco indica entre las alternativas de valorización de la escoria negra, cuya validez técnica, económica y medioambiental ha sido confirmada por experiencias a gran escala en la Comunidad Autónoma del País Vasco, su utilización como capa de rodadura, señalando como parámetros medioambientales a controlar en este tipo de aplicaciones el cadmio y el selenio.

○ **Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)**

Tal y como se analiza en profundidad en el punto 8 del presente estudio, la *Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio*, limita el contenido de cromo (VI) en el cemento y en los preparados que contienen cemento a 2 ppm en el caso de aquellas actividades en la que existe la posibilidad de contacto con la piel con el fin de proteger la salud de las personas.

Según el IECA esta limitación, recogida también en el *Anexo XVII<sup>104</sup> del Reglamento REACH punto 47. Compuestos de Cr VI*, en el caso de las mezclas o preparados se refiere al mortero normalizado elaborado con una arena CEN con un contenido nulo de cromo.

Por tanto, con objeto que dicha limitación se cumpla, los áridos utilizados en la elaboración de hormigón, entre los que podrían incluirse las escorias, deben tener un contenido nulo (0%) de cromo (VI) soluble en agua, tanto si se utilizan como un componente (árido) o una adición (de forma molida).

Debido a la elevada variabilidad en la composición de las escorias, el IECA señala la necesidad de controlar este contenido en cromo (VI) lote a lote ya que esta variabilidad tiene su origen en las materias primas y el contenido en cromo de las chatarras utilizadas en su caso.

En el caso concreto de la escoria negra, el IECA señala contenidos elevados de cromo, por lo que recomienda estudios exhaustivos de cromo (VI) en este tipo de escoria. Así mismo, en relación a los aspectos ambientales derivados del uso de la escoria negra en aquellas aplicaciones ligadas concluye que:

- Para su utilización como áridos de relleno y en capas de rodadura el principio de prudencia debe aconsejar una limitación en cromo (VI) idéntica a la que tienen los hormigones, ya que estos áridos, en esas dos aplicaciones citadas, pueden estar en contacto con agua y no se puede garantizar que no sean manipulados por los trabajadores.
- Para su utilización en la capa de rodadura, la escoria debería someterse a una prueba de lixiviación. Asimismo, teniendo en cuenta criterios internacionales, deberían establecerse valores límite para el cadmio y selenio.
- Para su uso como árido grueso en hormigón se deberían establecer criterios específicos para determinar el diagrama tensión deformación, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, retracción y densidad, así como criterios de dosificación para garantizar la durabilidad de este tipo de hormigones en diferentes clases de exposición ambiental.

---

<sup>104</sup> Anexo XVII REACH. Restricciones a la fabricación, la comercialización y el uso de determinadas sustancias, mezclas y artículos peligrosos

## Conclusiones. Consideraciones ambientales y sobre la salud humana de las escorias negras

La escoria negra se encuentra registrada bajo el *Reglamento REACH* y no cumple con los criterios para ser clasificada como peligrosa conforme al *Reglamento sobre la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP)*.

Posee un gran contenido en hierro, manganeso, aluminio, magnesio y titanio procedente de sus componentes principales. También se evidencia una notable presencia de bario, boro, cobre, vanadio, zinc, cromo y azufre entre sus componentes minoritarios. No obstante, al tratarse de un residuo sólido y debido a sus características físicas y químicas, está técnicamente confirmado que la lixiviación es el principal sistema potencial de emisión contaminante.

Los resultados analíticos facilitados sobre **el lixiviado de la escoria negra muestran contenidos inferiores a los valores límite establecidos en la distintas normas nacionales e internacionales de referencia** para aquellos parámetros detectados, **exceptuando el mercurio, el molibdeno, el selenio y los fluoruros, que superan esos límites** en algunos ensayos a los que se ha tenido acceso.

Pese a estos resultados, la mayoría de los documentos consultados recomiendan controlar la lixiviación de metales pesados en las escorias negras, prestando especial atención a los cuatro parámetros citados anteriormente, **mercurio, molibdeno, selenio y fluoruros, pero también a los siguientes: vanadio, bario y cromo**.

Por todo lo anterior, se considera que **el uso seguro de las escorias negras en aquellas aplicaciones no ligadas se podría garantizar siempre y cuando se estableciesen medidas adicionales de control**, como el establecimiento de condicionantes y restricciones de uso, valores límite de composición y de lixiviación, condiciones de aplicación y control de calidad.

En cuanto al **uso de la escoria negra en aplicaciones ligadas o en aquellos usos como materia prima en la fabricación de productos de construcción** (como su uso en la fabricación de clínker), **cabe esperar que los posibles impactos ambientales y a la salud humana derivados del uso de la escoria sean notablemente inferiores a los que cabría esperar en aplicaciones no ligadas**.

No obstante, en aquellas aplicaciones ligadas o en aquellos productos de construcción en cuya fabricación se hayan empleado escorias tratadas como materia prima, en las cuales los trabajadores tengan la posibilidad de manipular el material, debe controlarse el contenido de cromo (VI), limitado en 2 ppm en el cemento y en los preparados que contienen cemento según la normativa de referencia.

## 5.2 ESCORIA BLANCA

### 5.2.1 Proceso productivo

Las escorias generadas en la producción de acero al carbono mediante horno de arco eléctrico son de dos tipos, oxidantes y reductoras, o negras y blancas, respectivamente. Esta nomenclatura se debe a las dos etapas de las que consta el proceso productivo: fusión o metalurgia primaria, proceso que ha sido descrito con anterioridad en el presente estudio, y afino o metalurgia secundaria, proceso que se describe a continuación y que genera la escoria blanca.

La etapa de afino incluye la desoxidación, la desulfuración y la descarburación del acero, y tiene por objeto obtener un metal de bajo contenido en oxígeno y eliminar la mayor parte del azufre.

Siguiendo el proceso productivo del acero, el líquido fundido procedente de la etapa de fusión se vuelca a un recipiente, revestido de material refractario denominado cuchara de colada, que hace de cuba del horno de afino. El líquido fundido se cubre con una escoria reductora (escoria blanca) que permite la reducción de los óxidos metálicos en la fase denominada desoxidación. En esta fase la escoria se agita continuamente con el soplado de un gas inerte, normalmente argón, que se utiliza para homogeneizar la composición química del líquido fundido y la temperatura, evitar la oxidación secundaria del líquido fundido y facilitar el desplazamiento de las inclusiones metálicas hacia la escoria.

Paralelamente se produce la desulfuración del líquido fundido, que se produce por simple contacto del líquido fundido con la cal existente en la escoria reductora. Cuando se quieren obtener niveles muy bajos de azufre, menor de 0,008%, se añaden compuestos que contengan Si-Ca. Llegado ese momento, se procede a realizar análisis tanto del líquido fundido como de la escoria para cerciorarse de que el acero obtenido tiene la composición adecuada y que la temperatura del líquido fundido es la correcta. En caso de que la analítica desprenda unos resultados diferentes a los esperados, se procederá al ajuste de la composición de la colada, añadiendo las cantidades adecuadas de los elementos que faltan.

La cuchara de colada se lleva sobre una máquina de colada continua y vierte el acero fundido por un orificio situado en el fondo. Una vez colado el acero, la escoria blanca formada se recoge por diferencia de densidades en un recipiente denominado escoriador.

### 5.2.2 Características y composición

Entre las características de la escoria blanca figuran las siguientes:

**Tabla 5.2.2-1. Características<sup>105</sup> de la escoria blanca.**

| Propiedad | Descripción                   |
|-----------|-------------------------------|
| Aspecto   | Sólido inorgánico disgregable |

<sup>105</sup> Siderúrgica Sevillana S.A. <https://www.siderurgicasevillana.com/es/>

| Propiedad       | Descripción                   |
|-----------------|-------------------------------|
| Color           | Blanquecino-gris              |
| Olor            | Inodoro                       |
| pH              | 10-13                         |
| Punto de fusión | >1.000°C                      |
| Solubilidad     | < 100 mg/l                    |
| Densidad        | 3-4 g/cm <sup>3</sup> (20 °C) |

Otros documentos<sup>106</sup> indican densidades menores, concretamente densidades aparentes de 2,7 g/cm<sup>3</sup> y una densidad total de 1,4 g/cm<sup>3</sup>.

En cuanto a su composición mineralógica, los silicatos de calcio (con o sin pequeñas cantidades de aluminio o magnesio) bajo sus varias formas alotrópicas (diopside, merwinite, wollastonite, larnite, bredigite, ingesonite o olivine de calcio) son los compuestos mayoritarios en la estructura cristalina de la escoria reductora. Otras fases significantes son la portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>), periclase (MgO) y componentes menores (jasmundite, fluorite, brucite, óxidos de hierro y aluminio). De acuerdo al contenido de aluminio en la composición química de las escorias blancas, los aluminatos (spinel, mayenite o aluminato tricálcico) también están presentes<sup>107</sup>.

En cuanto a su composición química, la escoria blanca se produce en las últimas etapas de afino del proceso de fabricación del acero. Sus características pueden verse afectadas por las condiciones ambientales en su almacenamiento, las técnicas alternativas de procesamiento empleadas en cada planta, el producto final deseado o incluso por las variaciones metálicas de la propia materia prima, es decir, de la chatarra utilizada<sup>108</sup>.

Así mismo, como la escoria blanca se produce en el proceso posterior al de fusión, puede contener impurezas de la escoria negra que se hayan movilizado con el vertido del acero fundido del horno de fusión al de cuchara<sup>109</sup>.

En general, en la escoria blanca más del 60% de su peso está compuesto por óxidos de calcio y magnesio. El óxido de calcio es necesario para mantener la basicidad de la escoria, mientras que el óxido de magnesio se añade con el fin de proteger las paredes refractarias del horno cuchara. Los óxidos ácidos presentes son los correspondientes a los óxidos de silicio y aluminio, cuya concentración conjunta frecuentemente es inferior al 40% del peso total. En menor medida están los óxidos alcalinos, de hierro y de manganeso, los sulfuros

<sup>106</sup> Jordi Cañas Gallart. *Universidad Politécnica de Catalunya. Estudio del Comportamiento de Hormigones con Áridos Siderúrgicos de Horno Eléctrico. 2012.*

<sup>107</sup> Setién, J., Hernández, D. y González, J.J. s.l. *Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. Construction and Building Materials, 2008.*

<sup>108</sup> T. Herrero. Vázquez. *Estudio del efecto de la Hidratación de la Escoria Blanca de Acería de HEA: Aplicación en pastas y morteros de cemento. Universidad del País Vasco. 2015.*

<sup>109</sup> J. Hernández Puy. *Estudio de la Estabilidad Volumétrica, Propiedades Físicas y Químicas de la Escoria Negra de Acero de Horno de Arco Eléctrico. 2007.*

(del proceso de desulfuración), fluoruros y otros, tal y como puede apreciarse en la siguiente tabla con información:

**Tabla 5.2.2-2. Composición química de las escorias blancas.**

| Composición                    | CEDEX <sup>110</sup> | Solicitud de subproducto. Empresa 1 | Universidad Politécnica de Cataluña <sup>111</sup> | Uds.  |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------------------|--|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 17,4 - 19,3          | 17,0 - 31,6                         | 8-23   | %     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,1 - 3,6            | -                                   | -  | %     |
| FeO                            | 0,0 - 0,95           | 0,3 - 1,6                           | 0,5-2*   | %     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,2 - 10,4           | 10,4 - 15,9                         | 3-20   | %     |
| CaO                            | 45,3 - 62,1          | 43,6 - 63,8                         | 30-52  | %     |
| MgO                            | 4,5 - 17,2           | 6,1 - 17,0                          | 6-12   | %     |
| MnO                            | 0,0 - 1,2            | 0,3 - 2,5                           | 0,5-3*   | %     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | -                    | <0,1                                | -  | %     |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                    | <0,1                                | -  | %     |
| S                              | 1,45 - 1,65          | <0,1 - 1,5                          | -  | %     |
| Fluoruro                       | 1,4                  | -                                   | -  | %     |
| Sulfuro                        | 503                  | -                                   | -  | mg/kg |
| Zinc                           | 596                  | -                                   | 5-100  | mg/kg |
| Plomo                          | 84                   | -                                   | 5-100  | mg/kg |
| Cobre                          | 200                  | -                                   | 5-100  | mg/kg |
| Cromo                          | 150                  | -                                   | 100-5.000  | mg/kg |
| Níquel                         | 80                   | -                                   | 5-100  | mg/kg |
| Arsénico                       | -                    | -                                   | <25  | mg/kg |
| Cadmio                         | -                    | -                                   | <0,5-2   | mg/kg |
| Mercurio                       | -                    | -                                   | <0,01  | mg/kg |

\*Contenido del elemento sin sus óxidos

Según la bibliografía consultada<sup>112</sup>, las concentraciones de metales pesados perjudiciales para el medio ambiente no son significativas, existiendo trazas de algunos productos metálicos críticos como el plomo, níquel, cadmio, zinc, cobre, arsénico o mercurio. La ficha técnica del CEDEX señala que las escorias blancas se caracterizan por su bajo contenido en metales pesados, como por ejemplo en cromo, zinc o plomo, inferior al 1%.

### 5.2.3 Tratamiento y valorización de las escorias blancas

El proceso de valorización de las escorias blancas consiste en una serie de tratamientos físicos-mecánicos con dos objetivos fundamentales, primero separar el componente férrico presente para que pueda ser reutilizado

<sup>110</sup> CEDEX. *Ficha Técnica: Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico*. 2013.

<sup>111</sup> Jordi Cañas Gallart. *Estudio del comportamiento de hormigones con áridos siderúrgicos de horno eléctrico*. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. 2012.

<sup>112</sup> V. Ortega López. *Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales*. Universidad de Burgos. 2011.

en el horno de fusión y, segundo, obtener un producto rico en cal y sílice que pueda ser reutilizado en la fabricación de clínker, aplicación descrita posteriormente en este estudio. Las principales etapas se describen a continuación:

- Almacenamiento

La escoria blanca bruta incandescente se transporta en el escoriador al parque de escorias donde se vuelca. Con objeto de evitar la contaminación con otro tipo de materiales se deben asegurar espacios de acopios de escorias suficientemente compartimentados, así como establecer una separación física suficiente entre acopios que garantice que la escoria blanca no entra en contacto con la escoria negra.

- Estabilización de compuestos expansivos (maduración o envejecimiento)

Durante el volcado, la escoria blanca se riega con agua para evitar la emisión de partículas difusas, enfriarla y estabilizarla.

Según bibliografía consultada<sup>113</sup>, la escoria blanca precisa necesariamente ser estabilizada con los siguientes objetivos:

- Conseguir un comportamiento uniforme de las escorias, para lo cual es necesario removerlas para lograr el contacto con el ambiente exterior de todos sus componentes.
- Favorecer la formación de los hidróxidos de calcio y magnesio necesarios, para lo que es necesario el regado.
- Proteger el material de la acción del viento para evitar su dispersión.
- Desmetalización o desferretización

Con objeto de extraer el máximo contenido de hierro metálico debe realizarse una separación mediante procesos magnéticos, habitualmente realizada por medio de vehículos con electroimán. Este procedimiento es realizado en dos ocasiones, después del enfriamiento y después del cribado.

- Cribado y acopio

La escoria se criba mediante instalaciones móviles denominadas cribadoras. Estas cribadoras poseen a su vez cintas de separación magnética con objeto de retirar los restos más pequeños de metal. Finalmente, la escoria blanca acondicionada, con tamaños que varían entre 0 y 30 mm, se apila.

La escoria blanca tiende a formar una capa final superficial que le confiere impermeabilidad al apilamiento, no empapando ni disgregando el material.

---

<sup>113</sup> M. Isabel Prieto Barrio, A. Rodríguez Saiz, A. Cobo Escamilla, J.M. Manso Villaláis. *Estudio de la Corrosión de Armaduras Embebidas en Morteros Fabricados con Sustitución Parcial y Total de Áridos por Escorias Blancas de Horno Cuchara. V Congreso de ACHE. 2011.*

En relación al tratamiento, instalaciones más innovadoras tratan las escorias en un sistema de enfriamiento y pulverización, donde la parte férrica y los infundidos decantan. Se trata de un sistema mecánico por el que pasan la mezcla de polvo y restos metálicos, separándolos y evacuándolos por vías separadas. Las escorias avanzan en la línea pulverizándose de forma que las partículas son aspiradas a una batería de ciclones desde donde, por transporte neumático, son introducidas al silo para su almacenamiento y posterior expedición. Todo el proceso se hace en circuito cerrado, con sistemas neumáticos de transporte que garantizan emisiones mínimas<sup>114</sup>.

## 5.2.4 Aplicaciones

La ausencia de una alternativa de uso, técnica y económicamente viable para este tipo de escoria, ha dado lugar a que su destino más habitual consista en la deposición en vertedero, provocando a corto y medio plazo serios problemas tanto para las empresas generadoras como para el medio ambiente y la sociedad en general<sup>115</sup>.

Este destino ha ido en detrimento en favor de la única alternativa de valorización confirmada por experiencias realizadas a escala industrial, su utilización en las fábricas de cemento en sustitución de la marga, concretamente en la fabricación de clínker.

Cabe señalar, respecto a esta aplicación, el documento sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) para la fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio<sup>116</sup> señala como una MTD la "*utilización de los residuos como materias primas o combustibles*", concretamente aquellos "*residuos sin un valor calorífico elevado, pero con componentes minerales que, utilizados como materias primas, contribuyen a la fabricación de clínker como producto intermedio*".

### 5.2.4.1 Uso como materia prima en la fabricación de productos de construcción: Fabricación de clínker

El principal componente del cemento es el clínker. Este material se produce a partir de materias primas naturales, como la caliza y la arcilla, que se muelen, homogeneizan y se introducen en un horno rotatorio, donde se cuecen a una temperatura de 1.450°C, necesaria para formar el nuevo compuesto. Está formado por una mezcla de silicatos, aluminatos y ferritoaluminatos de calcio y se fabrica a partir de la denominada harina de crudo en las siguientes proporciones:

- 40-60% Silicato tricálcico o alita ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )
- 20-30% Silicato dicálcico o belita ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )
- 7-14% Aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ )

---

<sup>114</sup> Resolución de la Dirección General de Evaluación Ambiental, por la que se otorga la Autorización Ambiental Integrada a las instalaciones de la empresa CORRUGADOS GETAFE, S.L.U., ubicadas en el término municipal de Getafe. 2017.

<sup>115</sup> T. Herrero. Vázquez. Estudio del efecto de la Hidratación de la Escoria Blanca de Acería de HEA: Aplicación en pastas y morteros de cemento. Universidad del País Vasco. 2015.

<sup>116</sup> European Commission. Reference Document on Best Available Techniques the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. May 2010.



- 5-12% Ferritoaluminato tetracálcico ( $4Ca \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ )

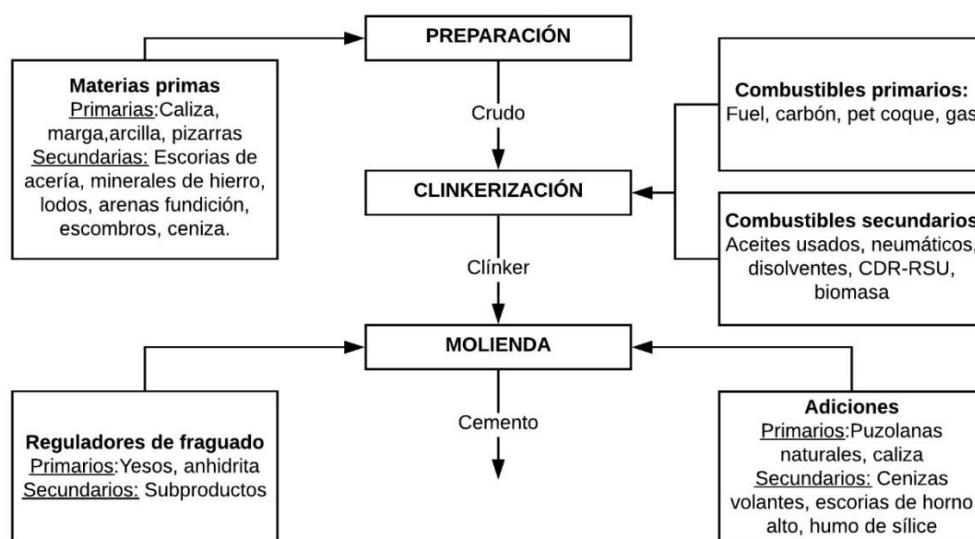
La harina de crudo es una mezcla finamente pulverizada de distintos minerales y sustancias que, mezclados en proporciones adecuadas, permiten las reacciones de descarbonatación y sinterización que tienen lugar a lo largo del circuito de las fábricas de cemento. Los constituyentes de la harina de crudo tienen por objeto proporcionar las fases hidráulicamente activas y un óptimo tamaño de grano. Para ello, cada componente del crudo debe aportar los elementos fundamentales necesarios para formar los constituyentes del clínker.

El proceso de fabricación del clínker de cemento comprende los dos primeros subprocesos que tienen lugar en una fábrica integral de cemento.

En primer lugar, el proceso de preparación de las materias primas consiste en la mezcla de todos los componentes y tiene lugar en los parques y silos de homogeneización. Los silos de homogeneización son silos de gran capacidad con dispositivos de fluidificación del material interior que permiten completar la homogeneización de la mezcla y, mediante el análisis de muestras de proceso, comprobar que la harina de crudo cumple los parámetros de proceso y módulos, establecidos previamente de acuerdo con el tipo de clínker que se desea producir.

En segundo lugar, las reacciones de clínkerización realizadas en el conjunto torre de intercambio-horno, donde la harina se calienta y tienen lugar distintos procesos fisicoquímicos como la deshidratación de los minerales, la descomposición de la arcilla, reacciones de descarbonatación de la caliza, reacciones en estado sólido y reacciones con participación de una fase líquida, así como la cristalización. El proceso termina con el rápido enfriamiento del clínker.

**Tabla 5.2.4.1-1. Proceso de fabricación del clínker de cemento.**



Posteriormente, al clínker se le añade yeso y otros materiales (escoria de alto horno, cenizas volantes, puzolanas, caliza, etc.) y conjuntamente se trituran en un molino hasta formar un polvo fino: el cemento.

#### 5.2.4.1.1 Viabilidad técnica de la escoria blanca. Fabricación de clínker

Según indicaciones de Siderúrgica Sevillana en la solicitud previa de subproducto, la escoria blanca se puede utilizar como materia prima en la fabricación de clínker en la industria cementera, concretamente como materia prima en sustitución de la marga, debido al alto contenido de óxido de calcio (CaO).

- **Catálogo de residuos CEDEX**

El *Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción "Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico"* de 2013 publicado por el CEDEX indica que para la utilización de las escorias blancas en las fábricas de cemento en sustitución de la marga no es necesario un tratamiento previo, siempre y cuando se tenga la precaución de no incluir elementos extraños, como trozos metálicos o trozos de refractario, y los tamaños de las partículas sean uniformes e inferiores a 50mm.

El documento señala también que los fluoruros aparecen en cantidades elevadas (1,4%) en la escoria blanca, por lo que deberá tenerse en cuenta en la práctica al influir negativamente en las propiedades del clínker, así como en las emisiones por razones medioambientales. Del mismo modo, apunta que contenidos superiores al 2% en magnesio pueden ocasionar inestabilidad de volumen por lo que su contenido está limitado por normativa, <5% de MgO según la *Instrucción para la recepción de cementos (RC-16)*. Por ello, el parámetro limitante es el magnesio y va a ser éste el que determine la máxima dosificación de escoria blanca, por lo general no mayor del 5%.

Es importante que la granulometría del material sea uniforme, de tamaño reducido (menor de 50 mm) y que no se incluyan en la escoria materiales extraños como hierro y trozos de refractario, fáciles de eliminar en origen.

El documento concluye que una vez realizada la prueba en cementera con una dosificación de la escoria blanca del 5%, el análisis de las resistencias muestra valores muy similares a los obtenidos en condiciones normales de funcionamiento.

- **Libro Blanco del País Vasco**

El Libro Blanco del País Vasco señala también como parámetro limitante de la escoria blanca para su uso en la fabricación de clínker al magnesio, no debiendo superar el 5%. Destaca también que el material sea uniforme y con una granulometría inferior a 50 mm, así como que se encuentre ausente de materiales extraños como hierro y trozos de refractario.

Los valores de las resistencias con una dosificación de escoria blanca del 5% son muy similares a los obtenidos en condiciones normales tal y como puede observarse en la siguiente tabla.

**Tabla 5.2.4.2-1. Valores de resistencia del clínker.**

| Composición | Clínker (media) | Clínker (escoria blanca) |
|-------------|-----------------|--------------------------|
| 2 días      | 20,0            | 26,5                     |
| 28 días     | 48,0            | 51,8                     |

Se concluye que los resultados confirman que la utilización de la escoria blanca es posible sin detrimento en la calidad del clínker obtenido, en lo que a composición química se refiere, no afectando a las resistencias del cemento obtenido, así como:

- La presencia de altos contenidos en sulfatos y sulfuros puede ocasionar importantes problemas de proceso, debido a la formación de pegaduras. Por otro lado, también hace prever un aumento en la emisión de SO<sub>2</sub>. En el caso de las escorias blancas el nivel de sulfatos es bajo y resulta aproximadamente similar al de la marga; por ello, sustituirla no implica aumento de SO<sub>2</sub> en las emisiones ni tampoco el desarrollo de formación de pegaduras.
- Los fluoruros aparecen en cantidades elevadas (1,4%), por lo que se deberá tener en cuenta tanto en el clínker como en las emisiones.
- Las concentraciones de metales son bajas y no van a influir ni en la calidad del producto final, ni van a suponer un aumento considerable en las emisiones.
- El nivel de aceites minerales es muy bajo, con lo que se garantiza que su influencia sobre el proceso productivo, las emisiones y calidad del clínker sea nula.

○ **Otros documentos**

Un estudio consultado<sup>117</sup> apunta que la presencia de SiO<sub>2</sub> reactiva por encima del 25% implica la posibilidad de mostrar propiedades hidráulicas y cementantes, por lo que, según los resultados analíticos citados anteriormente, las escorias blancas mostrarían un considerable potencial cementicio (17-31% SiO<sub>2</sub>). Además, a pesar de que la composición química parece no alterarse por el proceso de molienda, la SiO<sub>2</sub> reactiva es ligeramente superior para la escoria molida.

Este estudio señala la utilización y el potencial de la escoria blanca en la industria del cemento como materia prima para la fabricación de clínker y como materia prima en la producción de cemento belítico sulfoaluminoso (en un 10%). Los morteros de cemento confirman que cuanto mayor es la finura de la escoria empleada, mayores son sus resistencias mecánicas, más aún si la muestra está molida en vez de tamizada. Los valores de resistencias alcanzados permiten pensar en su posible uso en morteros de albañilería y en otras aplicaciones de cementos de baja resistencia. Con el objetivo de aumentar las resistencias mecánicas finales, los investigadores sugieren varios métodos de procesar el material de partida como el refundido de la escoria blanca, el uso de activadores químicos o el cribado del material según diferentes finuras.

No obstante, debe considerarse su potencial expansivo, que en el caso de una escoria blanca saturada en alúmina alcanza una expansión del 27% tras 80 días de ensayo sin lograr una estabilización volumétrica, y en el caso de una escoria blanca saturada en sílice registra un 8% de expansión logrando la estabilización tras 15 días.

---

<sup>117</sup> T. Herrero. Vázquez. *Estudio del efecto de la Hidratación de la Escoria Blanca de Acería de HEA: Aplicación en pastas y morteros de cemento. Universidad del País Vasco. 2015.*

La mineralogía que presentan estas escorias sugiere que la expansión está ligada a compuestos hidratados y/o carbonatados, a costa de fases con aluminio, magnesio y/o calcio. Son precisamente los compuestos hidratados y carbonatados, a costa de fases con aluminio, los que generan expansiones a largo plazo. Este hecho explica la imposibilidad de estabilizar la escoria con un contenido elevado de aluminio en su composición original.

Si bien la escoria blanca manifiesta cierta hidráulica, ésta afecta a las resistencias mecánicas sólo a edades tempranas y para un grado de sustitución inferior al 20%. Se demuestra que sustituciones parciales en torno a un 10% de escoria blanca inducen procesos cementantes.

Además, la expansión constatada en los morteros con estas escorias podría compensar (parcialmente) la retracción habitual en los morteros comunes.

El estudio concluye que las escorias blancas saturadas en alúmina manifiestan un comportamiento mecánico y durabilidad adecuados para su empleo en morteros de albañilería, siempre y cuando se traten y caractericen de forma conveniente.

Así mismo, otros documentos<sup>118</sup> que evalúan la utilización de la escoria blanca como aditivo en mezclas de morteros y hormigón como una alternativa en la industria de materiales de la construcción, indican que la composición química de la escoria blanca está constituida principalmente por óxido de calcio (CaO), óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), óxido de manganeso (MgO) y óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en concentraciones de 57,0; 24,04; 8,06 y 6,50; respectivamente, y su análisis granulométrico señala que el 31,91 % de la muestra se encuentra en la fracción 0,04-0,08 mm.

Dado estos parámetros, el estudio concluye que la utilización de la escoria blanca como una alternativa en la industria de materiales de construcción es posible, concretamente su utilización en cementos es factible en porcentajes de hasta el 15%, así como en morteros sin sobrepasar el 40% de escoria blanca.

### **Conclusiones. Viabilidad técnica de la escoria blanca**

Según la bibliografía consultada y la documentación facilitada en solicitudes previas de subproducto, la escoria blanca puede utilizarse en la fabricación de clínker, concretamente como materia prima en sustitución de la marga, debido al alto contenido de óxido de calcio (CaO).

La presencia de SiO<sub>2</sub> reactiva por encima del 25% implica la posibilidad de mostrar propiedades hidráulicas y cementantes, por lo que, según los resultados analíticos citados anteriormente, las escorias blancas mostrarían un considerable potencial cementicio (17-31% SiO<sub>2</sub>), ligeramente superior para la escoria finamente molida.

---

<sup>118</sup> E. García Avilés. *Escorias Blancas de Acería como Material de Construcción*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2014

No obstante, debe considerarse su potencial expansivo (contenido de MgO) que resulta mayor y más prolongado en el tiempo en el caso de escorias blancas saturadas en alúmina respecto a aquellas saturadas en sílice. **Dado que el parámetro limitante es el magnesio, va a ser éste el que determine la máxima dosificación de escoria blanca, por lo general no mayor del 5%** pudiendo llegar según ciertos documentos hasta el 15%.

Debe controlarse igualmente tanto el contenido en fluoruros, que aparecen en cantidades elevadas (1,4%) en la escoria blanca y que pueden influir negativamente en el clínker, como la presencia de materiales extraños, como hierro y trozos de refractario fáciles de eliminar en origen, así como la granulometría de la escoria, de manera que sea uniforme y de tamaño reducido (menor de 50 mm).

### 5.2.5 Consideraciones ambientales y sobre la salud humana

La escoria blanca se encuentra registrada<sup>119</sup> bajo el *Reglamento (CE) nº 1907/2006 (REACH)*. Sus códigos de identificación son los siguientes:

**Tabla 5.2.5-1. Códigos de identificación de la escoria blanca.**

| Nombre         | NºCAS      | NºEC      | Nº REGISTRO REACH     |
|----------------|------------|-----------|-----------------------|
| Escoria blanca | 65996-71-6 | 266-004-1 | 01-2119487457-23-0063 |

Así mismo, Siderúrgica Sevillana apunta que la escoria blanca no cumple con los criterios para ser clasificado como peligroso conforme al *Reglamento (CE) nº 1272/2008 sobre la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP)*.

La escoria blanca se caracteriza por su bajo contenido en metales pesados. No obstante, los efectos que puedan producir las escorias no dependen del contenido total de determinados elementos, si no de su potencial de lixiviación. A este respecto el siguiente estudio<sup>120</sup> analiza la composición y la lixiviación, bajo distintas condiciones de enfriamiento, de cuatro tipos de escoria de la producción del acero, entre las que se encuentra la escoria blanca (*ladle slag*) y cuyos resultados se muestran a continuación.

**Tabla 5.2.5-2. Lixiviación escoria blanca. UNE-EN 12457.**

| Parámetros | Valor (mg/kg) |
|------------|---------------|
| Ca         | 1.140         |
| Mg         | Nd            |
| Fe         | 0,37          |
| Si         | 15,6          |
| Al         | 298,5         |
| Cr         | 0,08          |
| Mo         | 0,008         |
| V          | 0,2           |

<sup>119</sup> <https://echa.europa.eu/es/registration-dossier/-/registered-dossier/16143>

<sup>120</sup> M. Tossavainen *Characteristics of Steel Slag Under Different Cooling Conditions. Sweden.2006.*

El estudio concluye que la escoria blanca se estabiliza formando estructuras vítreas hasta en un 98% de su composición cuando se enfría con agua, lo que constataría su baja capacidad de lixiviación y reducida solubilidad.

Así mismo, los resultados de este estudio se han comparado con los valores establecidos en el *Decreto 100/2018, de 20 de diciembre*, de valorización de escorias de Cantabria, constatando que todos los valores detectados en el lixiviado de las escorias se encuentran por debajo de los valores límite de referencia, aunque el estudio no analiza elementos básicos tales como Sb, As, Ba, Cd, Co, Cu, Hg, Pb, Ni, Se, Sn o Zn.

Otros estudios<sup>121</sup> indican cantidades apreciables de bario en el lixiviado de las escorias blancas. En aquellos elementos cuya liberación depende del pH del entorno, la cantidad liberada aumenta en medios ácidos, salvo en el caso de los cloruros, que su liberación alcanza el máximo en entornos ligeramente básicos.

#### 5.2.5.1 Uso de la escoria blanca como materia prima en la fabricación de productos de construcción: fabricación de clínker

Cabe esperar que los posibles impactos ambientales derivados del uso de la escoria en estos usos sean limitados, tal y como recoge el *Decreto 100/2018, de 20 de diciembre*, de Cantabria en el que los límites de lixiviación para los diferentes tipos de escorias, entre las que se encuentra la escoria blanca, podrán no ser de aplicación si se utilizan en la fabricación de cemento.

En este sentido, el Libro Blanco del País Vasco indica que la utilización de la escoria blanca en cementera en sustitución de la marga no presentaría ningún tipo de impacto de carácter medioambiental.

**Tabla 5.2.5.1-1. Condiciones de reciclaje escorias acería. Libro Blanco del País Vasco.**

| Vía reciclaje                           | Limitaciones medioambientales |
|---|-------------------------------|
| Fabricación de cemento (escoria blanca) | Ninguna                       |

Esta consideración se confirma por el País Vasco en la Reunión del Grupo de Trabajo de Subproductos y Fin de Condición de Residuo de 27 de noviembre de 2019, en la que se remarcó que **el nuevo decreto no regula las escorias blancas como el anterior, ya que éstas únicamente se utilizan en las plantas cementeras y dicho uso se viene realizando sin problemática alguna.**

Se ha tenido acceso a un estudio<sup>122</sup> cuyo objetivo es analizar la fabricación de hormigones a partir de diferentes escorias, entre las que se encuentra la escoria blanca, en sustitución del cemento.

<sup>121</sup> Karmele Otegi Aldai. *Estudio del impacto ambiental por lixiviación de la escoria de acería en capas granulares no ligadas. Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. 2012.*

<sup>122</sup> María Eugenia Parrón-Rubio, Francisca Perez-García, Antonio Gonzalez-Herrera, Miguel José Oliveira and María Dolores Rubio-Cintas. *Slag Substitution as a Cementing Material in Concrete: Mechanical, Physical and Environmental Properties. 2019.*

Aunque no es la aplicación concreta presente en este estudio, puede servir de referencia para evaluar el comportamiento de la escoria blanca cuando forma parte de una matriz. El estudio compara el lixiviado de un hormigón fabricado con un 30% de escoria blanca con el de un hormigón producido a partir de cemento Portland, cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 5.2.5.1-2. Lixiviación de hormigones con y sin escoria blanca (mg/L).**

| Parámetros       | Hormigón<br>Cemento<br>Portland | Hormigón 1 (30%<br>escoria blanca) | Hormigón 2 (30%<br>escoria blanca) |
|------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Magnesio (Mg)    | 0,0202                          | <b>0,0260</b>                      | <b>0,0313</b>                      |
| Silicio (Si)     | 0,0086                          | 0,0093                             | 0,0079                             |
| Titanio (Ti)     | <0,0001                         | <0,0001                            | <0,0001                            |
| Cromo total (Cr) | 0,0156                          | 0,0007                             | 0,0001                             |
| Manganeso (Mn)   | 0,0001                          | 0,0001                             | 0,0001                             |
| Hierro (Fe)      | 0,0182                          | 0,0018                             | 0,0082                             |
| Níquel (Ni)      | 0,0003                          | 0,0001                             | 0,0003                             |
| Cobre (Cu)       | 0,0019                          | 0,0015                             | <b>0,0040</b>                      |
| Zinc (Zn)        | 0,0066                          | 0,0029                             | 0,0044                             |
| Arsénico (As)    | <0,0002                         | <0,0002                            | <0,0002                            |
| Cadmio (Cd)      | <0,0001                         | <0,0001                            | <0,0001                            |
| Estaño (Sn)      | <0,0001                         | <0,0001                            | <0,0001                            |
| Plomo (Pb)       | 0,0005                          | 0,0002                             | 0,0003                             |

Según la tabla anterior, la mayoría de los valores obtenidos en el lixiviado de los hormigones producidos con escoria blanca son inferiores a los detectados en el lixiviado del Cemento Portland, excepto para el magnesio y el cobre, siendo significativa la reducción de cromo en las mezclas con escorias debido al encapsulamiento de la escoria en la matriz cementante.

Por otra parte, el Libro Blanco del País Vasco indica que, desde el punto de vista medioambiental, la utilización de escorias blancas en cementera, debido a su baja concentración en metales y elementos problemáticos, no supone un aumento considerable de las emisiones durante el proceso.

En relación con los posibles impactos adversos a la salud de las personas, la *Directiva 2003/53/CE, de 18 de junio*,<sup>123</sup> considera demostrado mediante estudios científicos que los preparados de cemento que contienen cromo (VI) pueden causar reacciones alérgicas en determinadas circunstancias cuando la piel humana está en contacto directo y prolongado con ellos. Considera también que todos los usos del cemento conllevan la posibilidad de un contacto directo y prolongado con la piel humana, con la excepción de los procesos controlados cerrados y totalmente automatizados.

<sup>123</sup> *Directiva 2003/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de junio, por la que se modifica por vigesimosexta vez la Directiva 76/769/CEE del Consejo respecto a la limitación de la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos (nonilfenol, etoxilatos de nonilfenol y cemento).*

En base a estos antecedentes y con el fin de proteger la salud humana, la *Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio*<sup>124</sup>, limita el contenido de cromo (VI) del siguiente modo:

- El cemento y los preparados que contienen cemento no se pueden usar o poner en el mercado si, una vez hidratados, su contenido de cromo (VI) soluble es superior al 0,0002 % del peso seco de cemento. Este requisito se exige a todos los cementos, ensacados y expedidos a granel, que se puedan comercializar legalmente y que estén sometidos al ámbito de la Instrucción RC-16.
- Cuando se usen agentes reductores y sin perjuicio de la aplicación de otras disposiciones comunitarias sobre clasificación, envasado y etiquetado de sustancias y preparados peligrosos, el envase del cemento o de los preparados que contienen cemento deberá ir marcado de forma legible e indeleble con información sobre la fecha de envasado, así como sobre las condiciones y el tiempo de almacenamiento adecuados para mantener la actividad del agente reductor y el contenido de cromo (VI) soluble por debajo del límite indicado en el punto anterior.
- A título de excepción, los puntos anteriores no se aplicarán a la puesta en el mercado y el uso en procesos controlados, cerrados y totalmente automatizados en los que el cemento y los preparados que contienen cemento sólo sean manejados por máquinas y en los que no exista ninguna posibilidad de contacto con la piel.

En el caso concreto de la escoria blanca, el IECA señala contenidos elevados de cromo, por lo que recomienda estudios exhaustivos del contenido en cromo (VI) en este tipo de escoria.

### **Conclusiones. Consideraciones ambientales y sobre la salud humana de las escorias blancas**

La escoria blanca se encuentra registrada bajo el *Reglamento REACH* y no cumple con los criterios para ser clasificada como peligrosa conforme al *Reglamento sobre la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP)*.

La escoria blanca se compone principalmente de óxido de calcio (CaO), en valores aproximados de entre 45-65% en peso, seguido por orden por el dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), el óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de magnesio (MgO) y se caracteriza por su bajo contenido en metales pesados existiendo trazas de algunos productos metálicos críticos como el plomo, níquel, cadmio, cromo, zinc, cobre, arsénico o mercurio.

No obstante, los riesgos o efectos que puedan producir las escorias no dependen del contenido total de determinados elementos, si no de su potencial de lixiviación. A este respecto, la escoria se estabiliza formando estructuras vítreas hasta en un 98% de su composición cuando se enfría con agua, lo que constataría su baja capacidad de lixiviación y reducida solubilidad, aunque ciertos documentos indican cantidades apreciables de bario en el lixiviado de las escorias blancas.

---

<sup>124</sup> *Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio, por la que se modifica el Anexo I del Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre, por el que se imponen limitaciones a la comercialización y al uso de ciertas sustancias y preparados peligrosos.*



Cabe esperar que **los posibles impactos ambientales derivados del uso de la escoria blanca en aquellos usos como materia prima en la fabricación de productos de construcción sean limitados**, como indican los distintos documentos consultados.

Ciertos estudios concluyen que **el uso de escoria blanca en una dosificación del 30% en hormigones en sustitución de cemento arroja una reducción en los valores de lixiviación de la mayoría de los parámetros analizados, siendo significativa la reducción de cromo debido al encapsulamiento de la escoria en la matriz cementante.**

Por otra parte, en este tipo de usos, en los cuales los trabajadores tengan el riesgo de manipular el material, debe controlarse el contenido de cromo (VI), limitado en 2 ppm en el cemento y en los preparados que contienen cemento según la normativa de referencia.

## 6. ESCORIA DE SILICOMANGANESO

La situación general del sector de las ferroaleaciones en España se caracteriza por la existencia de una única compañía de producción líder a nivel nacional, Ferroatlántica S.A.U, y que ocupa el tercer lugar a nivel europeo entre las empresas dedicadas a la producción de ferroaleaciones. La compañía posee cinco instalaciones de las cuales tres de ellas producen ferroaleaciones de silicomanganeso y que se ubican en las CCAA de Aragón, Cantabria y Galicia.

La industria de ferroaleaciones está ligada íntimamente y se desarrolla de forma conjunta a la industria siderúrgica como elemento indispensable en su proceso de fabricación y contribuye de manera decisiva en el desarrollo de otros tres sectores básicos: aluminio, siliconas y electrodos de soldadura. El ferromanganeso, el silicomanganeso y el ferrosilicio se emplean en un 90% en la fabricación de acero y un 10% en fundición, como desoxidantes y como aportadores de elementos de aleación.

A continuación, se presentan los últimos datos disponibles de producción nacional de silicomanganeso según distintas fuentes consultadas.

**Tabla 6-1. Producción de ferroaleación de silicomanganeso (toneladas).**

| Año                  | 1993    | 1994    | 1995    | 1996    | 1997    | -       |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| MINER <sup>125</sup> | 35.000  | 35.000  | 50.000  | 70.000  | 100.000 | -       |
| Año                  | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    |
| Ferroatlántica       | 154.207 | 173.607 | 179.595 | 168.179 | 169.089 | 162.086 |

En cuanto a la generación de escorias de silicomanganeso (en adelante escorias de SiMn), cabe señalar que se producen entre 0,9 y 2,2 toneladas de escorias de SiMn por cada tonelada de ferroaleación de silicomanganeso fabricado, lo que constata la alta generación del residuo.

El código LER asociado a este tipo de escorias es el 10 02 02 especificado a continuación:

10. "Residuos de procesos térmicos".

10 02. "Residuos de la industria del hierro y del acero".

10 02 02. "Escorias no tratadas".

### 6.1 PROCESO PRODUCTIVO

Las ferroaleaciones son materias primas básicas para la fabricación de aceros ordinarios y especiales. Estos productos se emplean como desoxidantes, desulfurantes y portadores de manganeso para proporcionar dureza, ductilidad y resistencia a la abrasión.

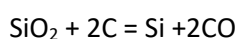
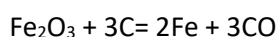
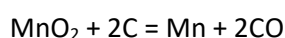
<sup>125</sup> MINER. Ministerio de Industria y Energía. Guías Tecnológicas. Directiva 96/61 Relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Epígrafe 2.5. Ferroaleaciones.

La aleación de silicomanganeso, por la que se genera la escoria de SiMn, se obtiene por reducción de los óxidos de manganeso y de silicio, aportados por los diferentes minerales, en hornos eléctricos de arco-resistencia y a temperaturas elevadas que se consiguen por medio de la energía eléctrica que se aporta.

Las **materias primas** que se utilizan en la fabricación de la aleación de silicomanganeso son las siguientes:

- **Minerales de manganeso:** con porcentajes superiores al 40% de contenido de manganeso, así como otros componentes escorificables, formados principalmente por sílice, alúmina, cal y óxidos de magnesio. El manganeso en los minerales se presenta en forma de óxido o de carbono. El resto de los componentes de los minerales, como SO<sub>2</sub>, CaO, MgO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, se combinan con el MnO formando combinaciones complejas de silicatos cálcicos.
- **Mineral de sílice (cuarzo y/o cuarcita):** se utiliza en la fabricación de SiMn como portador de silicio. La sílice cristalina se presenta principalmente en cuatro formas minerales: cuarzo, cristobalita, tridimita y trípoli, siendo la primera la más abundante. La cuarcita es una roca metamórfica que contiene cuarzo en contenidos de hasta el 99%.
- **Escorias:** en el proceso de producción de SiMn en horno eléctrico se utilizan como materia prima las escorias obtenidas en la fabricación de FeMn sustituyendo al mineral de Mn. Por ello, actualmente se trabaja en un ciclo combinado de fabricación de ambas ferroaleaciones.
- **Carbones:** en la producción de SiMn se utilizan distintos carbones como elementos reductores, como el coque metalúrgico y, en menor medida, el coque de petróleo.
- **Fundentes:** los fundentes permiten la formación de una escoria que permite las reacciones metalúrgicas, recoge los componentes minerales que no reaccionan y aporta fluidez haciendo que la escoria flote encima del material fundido. En la fabricación de SiMn se utilizan habitualmente la dolomía y la caliza.

En la producción de SiMn, el proceso de reducción que tiene lugar dentro del horno se basa en la eliminación del oxígeno contenido en los minerales al combinarse con el carbono reductor. Se trata, por tanto, de una carbotermia, en la que tienen lugar las siguientes reacciones:

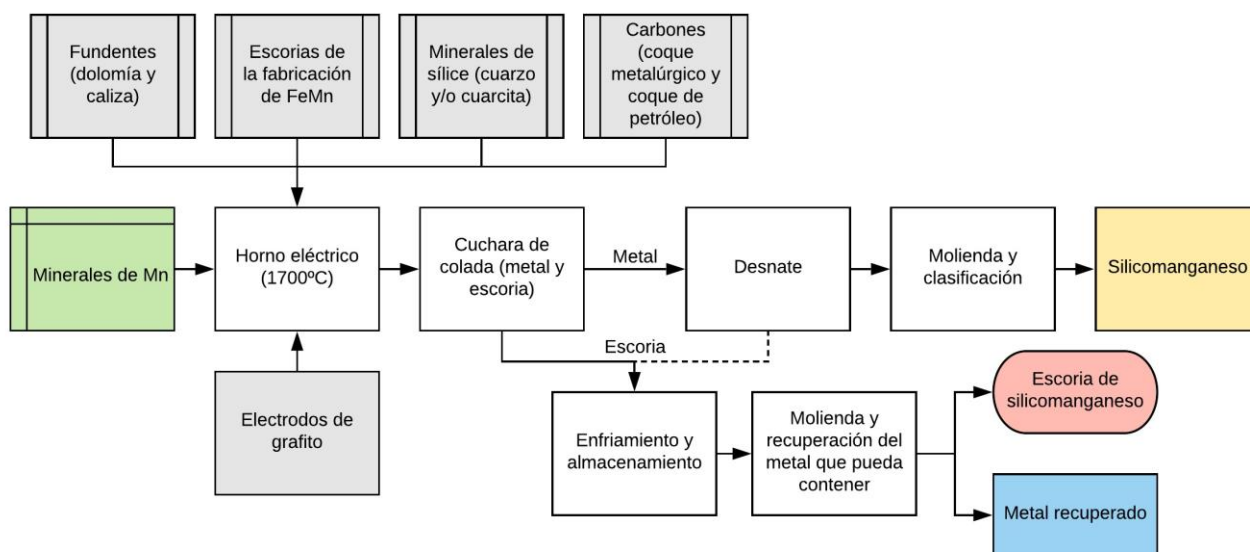


La escoria de SiMn es el resultado de la fusión en el horno de los fundentes y del resto de componentes que no se incorporan a la fase metálica. La salida del material fundido (colada) se realiza a través de las bocas de éste. Cada horno tiene dos o tres bocas que se van abriendo para permitir la salida del metal y la escoria según la necesidad. Desde las bocas, el metal y la escoria pasan por unos canales de colada hasta las cucharas de colada. La cuchara de colada se llena con una mezcla de ferroaleación y escoria, ésta última debido a su menor densidad, se queda en la superficie y se vierte directamente a una era a través de un canal. Una vez allí, se muele y se recupera el metal que pueda contener.

El metal es sometido a un proceso de desnate consistente en la eliminación de la escoria residual que haya podido quedar. Por último, se vierte el contenido de ferroaleación en una era de metal, donde permanece hasta su solidificación y posterior molienda y clasificación.

Se adjunta esquema elaborado por EMGRISA que muestra el proceso de fabricación de silicomanganeso:

**Imagen 6.1-1. Fabricación de silicomanganeso.**



## 6.2 CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN

La escoria de SiMn se trata de un compuesto mineral rocoso, de tipo silicato aluminico cálcico, inerte y que presenta un color verde generalizado, debido a la presencia de manganeso. La densidad<sup>126</sup> de la escoria de SiMn (como árido fino) es de 2,69 kg/dm<sup>3</sup> y de 2,64 kg/dm<sup>3</sup> (como árido grueso). La composición química general, tal y como indica la caracterización fisicoquímica de la escoria facilitada por Ferroatlántica, se compone principalmente de sílice, cal, alúmina, óxido de manganeso y magnesio, representando la suma de estos componentes casi el 90 % de su composición química.

Se puede encontrar cierta cantidad de Fe, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, P, Zn, Cu y Cr en cantidades que pueden alcanzar hasta un centenar de ppm (mg/kg). Por otra parte, se puede observar que la escoria de SiMn se caracteriza por su elevado contenido en manganeso, superior a otros tipos de escoria, tal y como puede observarse en la siguiente tabla. También se incluye la composición de la escoria disponible en un estudio del CEDEX:

<sup>126</sup> Moisés Frías, M.<sup>a</sup> Isabel Sánchez de Rojas, Ignacio Menéndez. Viabilidad de escorias de SiMn como árido de reciclado en hormigones. Ministerio de Educación y Ciencia. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 2004.

**Tabla 6.2-1. Composición química de la escoria SiMn (%)**

| Composición                    | CSIC, 2011 <sup>127</sup> . | CEDEX, 2003 <sup>128</sup>                 |
|--------------------------------|-----------------------------|--|
| SiO <sub>2</sub>               | 36,96-46,01                 | 38,43                                      |
| CaO                            | 25,48-27,98                 | 27,80                                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7,05-8,43                   | 14,90                                      |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8,04-15,5                   | 7,72 (como MnO)                            |
| MgO                            | 6,84-13,62                  | 6,52                                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,62-1,37                   | 0,9  |
| SO <sub>3</sub>                | 0,76-0,85                   | 1,34                                       |
| K <sub>2</sub> O               | 0,53-0,68                   | 1,53 (como K <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,16-0,21                   | 0,36                                       |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,15-0,22                   | -  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,02-0,05                   | -  |
| SrO                            | 0,08-0,09                   | -  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,02-0,03                   | -  |
| ZnO                            | 0,0                         | -  |
| Pérdida al fuego               | 2,41-5,16                   | -  |

En cuanto al contenido de metales en la escoria de SiMn puede constatarse la presencia de los siguientes elementos:

**Tabla 6.2-2. Metales en la escoria SiMn<sup>129130</sup>.**

| Metales       | Valor (mg/kg) |
|---------------|---------------|
| Arsénico (As) | 17            |
| Cadmio (Cd)   | 2             |
| Cobre (Cu)    | 70            |
| Cromo (Cr)    | 26            |
| Mercurio (Hg) | 0,14          |
| Níquel (Ni)   | 73            |
| Molibdeno     | 3             |
| Manganeso     | 13.000        |
| Plomo         | 6             |
| Cinc          | 24            |
| Cobalto       | 18            |

<sup>127</sup> CSIC. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Informe de resultados de la caracterización química (óxidos metálicos) de las escorias. 2011.

<sup>128</sup> CEDEX. Análisis de una muestra de escoria de silicomanganeso enfriada al aire. Convenio de aplicaciones en firmes de carretera de una escoria de silicomanganeso de Ferroatlántica S.L. 2003.

<sup>129</sup> Hidronitro Española, S.A. Análisis de caracterización de escorias. 1996.

<sup>130</sup> SGS Bilbao. Reporte final. Caracterización escorias de SiMn de la fábrica de Boo. Diciembre 2012.

### 6.3 TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE SILICOMANGANESO

El proceso de valorización de las escorias de SiMn consta de ciertas etapas para garantizar calidades y tamaños del material granular resultante, con objeto de comercializarse para sus diferentes aplicaciones finales detalladas en profundidad en el apartado 6.4 de este estudio.

- Almacenamiento y enfriamiento

La escoria de SiMn, una vez producida, se vierte en zonas de acopio donde se deja enfriar al aire libre.

- Molienda o machaqueo, recuperación del metal y cribado

Posteriormente, se traslada a la cama de acondicionamiento, donde se muele, se recupera el metal que contiene y se comercializa. En una de las AAI de las instalaciones de Ferroatlántica se indica que las escorias de SiMn sufren un proceso de recuperación del metal todavía presente en ellas (alrededor del 5%) por diferencia de densidad, para después ser reutilizados en su totalidad para la fabricación de zehorras artificiales para la construcción.

En determinados casos concretos, necesita un acondicionamiento granulométrico específico (tritución) en función de su uso posterior, consistente en un machaqueo y un cribado posterior.

Según indica Ferroatlántica, la escoria de SiMn en ningún caso necesita ser tratada con objeto de alterar su composición química o las propiedades intrínsecas de la misma, por lo que no necesita etapas de maduración o envejecimiento.

### 6.4 APLICACIONES

Según datos facilitados por Ferroatlántica, las instalaciones de Aragón y Cantabria han comercializado históricamente más de 475.000 y 900.000 toneladas de escoria de SiMn respectivamente en los últimos diez años para distintos fines, que abarcan tanto aplicaciones ligadas como no ligadas, en proyectos e infraestructuras del Gobierno de Aragón, el Ministerio de Fomento o la Diputación Provincial de Huesca. Así mismo, datos facilitados sobre la tercera instalación ubicada en Galicia indican una tasa de utilización de la escoria en los últimos cinco años del 85%, constando notificaciones de entrega del material a varias empresas constructoras.

La tasa de utilización media de escorias de SiMn, a partir de los datos facilitados por Ferroatlántica, se sitúa en el 72%, tal y como puede observarse en la siguiente tabla:

**Tabla 6.4-1. Producción, venta y utilización de escorias de SiMn. Ferroatlántica.**

| Año  | Producción(t) | Ventas (t) | Tasa utilización (%) |
|------|---------------|------------|----------------------|
| 2010 | 197.760       | 147.967    | 75                   |
| 2011 | 213.347       | 105.794    | 50                   |
| 2012 | 235.835       | 131.851    | 56                   |
| 2013 | 208.933       | 178.370    | 85                   |
| 2014 | 202.843       | 173.757    | 86                   |

| Año      | Producción(t) | Ventas (t) | Tasa utilización (%) |
|----------|---------------|------------|----------------------|
| 2015     | 165.578       | 140.443    | 85                   |
| Total    | 1.224.296     | 878.182    | 72                   |
| Promedio | 204.049       | 146.364    | 72                   |

Numerosas empresas dedicadas a la realización de obras, prestación de servicios y producción de materiales para la construcción, han firmado contratos con Ferroatlántica para la compra-venta de las escorias de SiMn producidas en sus instalaciones

#### 6.4.1 Uso como árido. Aplicaciones no ligadas de la escoria de silicomanganeso

Las aplicaciones no ligadas son aquellas en que los materiales granulares se colocan compactados en (sucesivas) capas para la ejecución de diversas unidades de obra civil, sin que se adicione conglomerante alguno.

Según la documentación facilitada por Ferroatlántica, la escoria de SiMn pretende utilizarse como sustituto de la zahorra y de materiales pétreos en cualquier uso de obra pública y construcción de carreteras, vías públicas o privadas de tráfico rodado, en todas las capas estructurales de firme contempladas en el PG-3, obras de urbanización, restauración y formación de terraplenes.

Para justificar estos usos, Ferroatlántica aporta un estudio<sup>131</sup> llevado a cabo por el CEDEX, cuyo objeto es la caracterización de la escoria de SiMn para **su uso como árido en capas de firme**, correspondiente al Convenio “Aplicaciones en firmes de carretera de una escoria de SiMn de Ferroatlántica”.

En dicho trabajo se analizaron la composición química y mineralógica, así como las propiedades físicas y mecánicas de las escorias, poniendo especial atención a su estabilidad volumétrica y a su aplicación en capas granulares. Las especificaciones que tienen que cumplir las capas granulares están establecidas en la Parte 5. Capítulo I. Capas granulares del PG-3, que desarrolla el artículo 510, relativo a las zahorras.

Según este artículo, se define zahorra como un material de granulometría continua (es decir, una mezcla de árido grueso y árido fino), constituido por partículas total o parcialmente trituradas, en la proporción mínima que se especifique en cada caso y que es utilizada habitualmente como capa de firme, concretamente en la capa base o subbase, situadas sobre la explanada, como se puede ver en la siguiente imagen.

---

<sup>131</sup> CEDEX. *Análisis de una muestra de escoria de silicomanganeso enfriada al aire. Convenio de aplicaciones en firmes de carretera de una escoria de silicomanganeso de Ferroatlántica S.L. 2003.*

Imagen 6.4.1-1. Esquema de composición de las estructuras de firme y explanada<sup>132</sup>



En consecuencia, de todos los posibles usos indicados por las empresas productora y receptoras de la escoria de SiMn, desde el punto de vista técnico, se entiende que el estudio del CEDEX únicamente aborda la viabilidad técnica de la escoria como zahorra, habitualmente empleada como capa base o subbase de los firmes de carretera, mediante el análisis del cumplimiento de las especificaciones establecidas en el artículo 510 del PG-3.

Cabe señalar que el estudio del CEDEX también concluye que las escorias de SiMn, con la granulometría adecuada, pueden ser empleadas como suelo en explanadas, aunque no se determina qué tipo de granulometría se requiere, ni se hace referencia al cumplimiento de las especificaciones de la normativa que regula esta capa del firme<sup>133</sup>.

Finalmente, aunque Ferroatlántica señala el empleo reciente de la escoria de SiMn como árido en distintas carreteras de Cantabria y Aragón, se desconoce en qué capa del firme se ha empleado, y si se ha aceptado su uso en capas como la explanada, así como en otras aplicaciones como son los rellenos<sup>134</sup> tipo terraplén.

En consecuencia, la única aplicación no ligada para la cual se ha justificado la viabilidad técnica de la escoria de SiMn, es para su uso como zahorra.

<sup>132</sup> Gobierno Vasco. Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco. 2012.

<sup>133</sup> La Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre por la que se aprueba la Norma 6.1 IC Secciones de firme, establece en su artículo 5.1 las instrucciones para la formación de explanadas y en su artículo 5.2 se determinan los tipos de materiales que pueden emplearse para ello.

<sup>134</sup> En la Guía Tecnológica. Directiva 96/61 relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Epígrafe 2.5. Ferroaleaciones del Ministerio de Industria y Energía, se incluye el relleno como una de las posibles aplicaciones de la escoria de SiMn procedente de horno de arco eléctrico, si es no de calidad adecuada y rica en MnO, que en este caso se reutilizaría como materia prima en la producción de SiMn.



#### 6.4.1.1 Viabilidad técnica de las escorias de silicomanganeso. Aplicaciones no ligadas

##### ○ **Estudio CEDEX**

El estudio comprende el análisis de la composición química y mineralógica de la escoria de SiMn, la adecuación de sus propiedades físicas y mecánicas (granulometría, dureza de las partículas y resistencia a la fragmentación mediante el ensayo de desgaste de Los Ángeles<sup>135</sup>), la alterabilidad del material (grado de envejecimiento del material) y los posibles efectos del lixiviado de la escoria de SiMn sobre el medio ambiente. En base a los resultados obtenidos, se analiza la aplicabilidad de la escoria como árido en zahorras para capas de firme de carretera.

Estos ensayos fueron llevados a cabo sobre una muestra de escoria de SiMn enfriada al aire con el fin de que las partículas fueran porosas, con una granulometría comprendida entre 10 y 40 mm, recogida sobre el material acopiado parcialmente triturado con una retroexcavadora.

El estudio aclara que los ensayos físicos y mecánicos fueron realizados sobre las escorias recogidas directamente de los acopios y, por tanto, no han sido sometidos a un proceso de machaqueo, por lo que los resultados suponen una aproximación a los que realmente se obtendrían si la escoria fuese tratada convenientemente mediante cribados y machaqueos. Los ensayos de caracterización química fueron llevados a cabo sobre una muestra de escoria formada por partículas vítreas, separadas manualmente del material acopiado.

De todos los ensayos realizados sobre la muestra de escoria enfriada al aire se han obtenido las siguientes conclusiones:

- En cuanto a la composición química, la escoria muestra un contenido total de azufre ligeramente superior al límite admitido del 1% en el PG-3 (1,34 %).

Además de medir azufre, por ser una de las especificaciones establecidas en el PG-3 para las zahorras, se determinaron otros parámetros que permiten determinar si entre los componentes del material hay alguno que pueda suponer el desarrollo de alteraciones físico-químicas que afecten a la durabilidad del material o a la de los materiales que se encuentren en contacto con él. Estos parámetros son azufre soluble en agua y azufre soluble en ácido, obteniendo contenidos muy bajos para ambos (0,01 y 0,19 %, respectivamente). Por otro lado, las concentraciones de sulfato detectadas en el lixiviado de la escoria de SiMn, (realizado en base a la norma NLT<sup>136</sup> 326/00 "*Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras (método del tanque)*") son muy bajas.

Por todo ello, el estudio concluye que no se aprecia que el empleo de la escoria de SiMn tratada pueda suponer un perjuicio para el medio o para otros elementos constructivos. No obstante, señala

---

<sup>135</sup> Ensayo que permite determinar la resistencia a la fragmentación de los áridos, necesaria para asegurar la estabilidad de la granulometría durante las fases de manipulación y compactación del material y posteriormente en servicio.

<sup>136</sup> Normas técnicas publicadas por el CEDEX que han sido sustituidas por las normas UNE.

también que, podría cumplirse estrictamente la especificación relativa al azufre mezclando la escoria con, al menos, un 25 % de árido fino natural.

- Pese a que se detecta una proporción importante de CaO, el contenido de cal libre es nulo y un porcentaje bajo de MgO.

En relación con los ensayos físicos y mecánicos:

- Para determinar la granulometría, se realizaron ensayos para establecer la distribución por tamaños, con el fin de poder estimar si pueden existir dificultades para obtener una determinada granulometría por falta o exceso de alguno de los tamaños necesarios o si puede dar problemas de segregación (falta de finos o exceso de gruesos) o compactación (falta o exceso de finos).

El estudio indica que las fracciones más gruesas están formadas por partículas vítreas y las fracciones más finas por partículas porosas, aunque no se han analizado fracciones < 10 mm.

Según el estudio, la fracción 0/40 mm presenta pocas partículas de tamaño inferior a 8 mm, por lo que **no se inscribe en los husos granulométricos indicados en el artículo 510 del PG-3**. Para adaptarse a estos husos, el estudio señala que un proceso adecuado de machaqueo o cribado, podría ajustar las características del material a las exigidas en el artículo 510 del PG-3.

- En cuanto a la resistencia a la fragmentación, el ensayo se llevó a cabo sobre dos tipos de muestra: uno sobre escoria vítrea y otro con una muestra formada por el conjunto de partículas de la escoria. El desgaste de Los Ángeles de la muestra de la escoria enfriada al aire presenta un valor de 42, algo superior al obtenido en la muestra con sólo partículas vítreas (40).

Según el artículo 510 del PG-3, el coeficiente debe ser menor de 30 para calzadas con tráfico elevados (T00 a T2) o de 35 si se utiliza en arcenes o con tráfico bajos (T3, T4 y arcenes). No obstante, el PG-3 admite que en el caso de las escorias siderúrgicas este coeficiente se amplíe en 5 puntos siempre y cuando su composición granulométrica esté adaptada al huso ZAD20.

**Tabla 6.4.1.1-1. Valores de la escoria de SiMn frente a los indicados en el PG-3.**

| Parámetro   | Escoria SiMn (Estudio CEDEX)              | PG-3                                       | Unidades |
|---|---|--|----------|
| Azufre  | <b>1,3</b>                                | <1   | (%)      |
| Cal   | 0   | <5   | (%)      |
| Índice granulométrico de envejecimiento (NLT-361)           | 0,05-0,08                                 | <1   | (%)      |
| Resistencia a la fragmentación (coeficiente de Los Ángeles) | 40 partículas vítreas y 42 en su conjunto | <30* (T00 a T2)<br><35* (T3, T4 y arcenes) | -        |

*\*Para materiales reciclados procedentes de capas de firme de carretera, así como para áridos siderúrgicos, el valor del coeficiente de Los Ángeles podrá ser superior en cinco (5) unidades siempre y cuando su composición granulométrica esté adaptada al huso ZAD20.*

Como se ha comentado anteriormente, la escoria de SiMn analizada no se adapta a los husos granulométricos del PG-3. No obstante, tal y como se ha indicado anteriormente, los ensayos se han realizado sobre una muestra de escoria acopiada y no tratada por lo que, tal y como el propio estudio señala, podría ser que tras un adecuado cribado y machaqueo, se pudiese cumplir esta especificación.

Considerando el mismo criterio que para las escorias siderúrgicas (véase nota de la tabla anterior), únicamente cuando se adapte al huso ZAD20, el uso de las escorias de SiMn como material granular podría ser aplicable a la categoría de tráfico T3, T4 (firmes de tráfico bajo) y arcenes, solo las partículas vítreas y en ningún caso para tráfico elevados.

En esta línea, el estudio del CEDEX remarca que, si las escorias se compactan adecuadamente, podrían tener una capacidad portante suficiente para constituir capas granulares de base poco sensibles al agua en firmes de tráfico bajo (T3 y T4). Además, añade que su limpieza, ausencia de plasticidad y elevado rozamiento interno pueden compensar que la resistencia a la fragmentación se encuentre cerca del límite de la especificación.

Es por ello que se recomienda que se realicen pruebas experimentales para este empleo. En este sentido, Ferroatlántica señala el uso reciente de la escoria de SiMn en distintas carreteras de Cantabria (autovía Ronda Bahía- enlace Astillero, autovía Liaño-Guarnizo) y Aragón (autovía Fraga-Huesca, Barbastro, N-240 y N-123).

- Respecto a la estabilidad de volumen, el grado de envejecimiento alcanzado, según ensayos bajo la norma NLT 361/91, es muy inferior al 1% (PG-3) por lo que no es de esperar fenómenos de inestabilidad o hinchamientos por hidratación de la muestra de escoria de SiMn enfriada al aire.
- No se aprecia plasticidad en los finos, por lo que cumple las especificaciones del PG-3 para zahorras.

Por otra parte, el PG-3 requiere la comprobación de otro tipo de parámetros que no han sido incluidos en este estudio. El art. 510, establece para el árido grueso > 4 mm, el análisis de la angulosidad (% de caras de fractura), proporción de partículas total y parcialmente trituradas del árido grueso, proporción de partículas totalmente redondeadas; forma (índice de lajas) FI < 35 y el equivalente de arena.

#### ○ **Declaración de prestaciones**

Ferroatlántica adjunta una declaración de prestaciones del año 2014 emitida por la empresa fabricante Hormigones del Pirineo S.A. (HORPISA) en la que se señala el cumplimiento de los requisitos establecidos en la norma *UNE EN 13242:2002+ A1:2007. Capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para su uso en capas de estructura de firmes para un sistema de control de producción en fábrica +2* para la escoria de SiMn (árido grueso 18/25) para su uso en capas granulares con ligantes hidráulicos (zahorra) en capas de firme, de acuerdo con el certificado de control de producción en fábrica de los áridos nº 0099/CPR/60/0377 emitido por el organismo notificado AENOR.

#### ○ **Otros estudios**

Se han identificado dos estudios en los que se evalúa la viabilidad de la escoria de SiMn para su uso como árido para la construcción de firmes, además de otras aplicaciones.

Uno de los estudios, de reciente publicación,<sup>137</sup> confirma la viabilidad de la escoria de SiMn para su uso en capas de firme de acuerdo con las normas brasileñas para uso en capas base y subbase, tras el análisis de parámetros como granulometría, coeficiente de desgaste de Los Ángeles, resistencia a la degradación, estructura, esfericidad, angulosidad, etc. Coincide con el estudio del CEDEX en que se considera recomendable la mezcla de la escoria de SiMn con árido natural debido al predominio de áridos gruesos y en que no se observan fenómenos de expansividad.

El otro estudio<sup>138</sup> confirma el uso de la escoria de SiMn como árido para hormigón, como material de relleno en terraplenes, además de su empleo en aplicaciones ferroviarias.

Concretamente, concluye que el árido grueso fabricado a partir de escoria de SiMn puede utilizarse como balasto ferroviario para todo tipo de vías férreas. La forma áspera y angular de la escoria proporciona un lecho ferroviario estable, señalando que las escorias tienen una gran resistencia al desgaste y a la abrasión, que minimiza la degradación debida al tráfico pesado. En relación con el empleo de la escoria de SiMn en rellenos, la considera adecuada como material estructural para la construcción de terraplenes de carreteras o el relleno de otras áreas.

#### 6.4.2 Uso como árido. Aplicaciones ligadas de la escoria de silicomanganeso

##### a) Fabricación de hormigón

El hormigón es un compuesto formado a partir de la mezcla de grava, gravilla y arena, con unas condiciones en cuanto a sus características mecánicas, químicas y granulométricas definidas, unidas entre sí por una pasta aglomerante hidráulica formada por un conglomerante (cemento) y agua.

A este material básico y en el momento de su amasado pueden añadirse otros productos o materiales para mejorar algunas características determinadas (adiciones y aditivos) como cenizas volantes y humo de sílice, tal y como figura en la *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*.

Los áridos son fundamentales en la fabricación de morteros y hormigones debido a su contribución en la estabilidad de volumen, en la resistencia y en aspectos económicos, no interviniendo en el fraguado o el endurecimiento. En el aspecto técnico, los áridos ejercen una influencia muy positiva en las resistencias mecánicas, retracción, fluencia, abrasión e incluso durabilidad de los morteros. En la siguiente tabla se presentan las proporciones de elementos que generalmente tiene un hormigón:

---

<sup>137</sup> Filipe Batista Ribeiro, Bruno Guida Gouveia, Filipe Almeida Corrêa do Nascimento, Felipe Dias Costa, Marcelino Aurélio Vieira da Silva. *Characterization of silicon-manganese iron slag for employment in base and sub-base layers for highway. Department of Transportation Engineering, COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil. 2020*

<sup>138</sup> Abhay Vinayakrao Patil, Anant Manohar Pande. *Behaviour of Silico Manganese Slag Manufactured Aggregate as Material for Road and Rail Track Construction. Advanced Materials Research Vols 255-260 (2011) pp 3258-3262 Online: 2011-05-31 (2011) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3258. Civil Engineering, Yeshwantrao Chavan College of Engineering, Wanadongri, India. 2011*

**Tabla 6.4.2-1. Composición del hormigón.**

| Tipo de cemento                    | % en volumen |
|------------------------------------|--------------|
| Aglomerante (cemento hidráulico)   | 10-15        |
| Áridos granulares                  | 65-75        |
| Agua                               | 15-20        |
| Aire ocluido                       | 1-2          |
| Aditivos y adicciones (eventuales) | Variable     |

Como se puede apreciar en la tabla anterior, un alto porcentaje del volumen de los morteros está ocupado por áridos, que conforman una estructura granular que crea huecos para la pasta de cemento que une el conjunto. No deben emplearse áridos activos frente a los propios componentes del cemento o frente a agentes externos como el agua, aire, hielo, etc.

Los tamaños de los áridos procedentes de la naturaleza y de procesos industriales o reciclados son muy diversos. Las partículas se suelen dividir en dos grupos en función del tamaño límite fijado por la *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*.

- Áridos finos: áridos que pasan por el tamiz 4 mm (arenas).
- Áridos gruesos: fracción de áridos que quedan retenidos por el tamiz 4 mm.

A la hora de la fabricación de morteros y hormigones es muy importante conocer la densidad de los áridos, que depende de los poros que sus partículas contengan y cómo estén conectados entre sí. Otro factor para tener en cuenta en los áridos es la absorción y la porosidad, ya que tiene una gran influencia en la adherencia con la pasta de cemento, y, por consiguiente, en las resistencias mecánicas.

#### 6.4.2.1 Viabilidad técnica para aplicaciones ligadas. Fabricación de hormigón

- o **Documentación facilitada por Ferroatlántica**

La documentación facilitada por Ferroatlántica incluye un estudio<sup>139</sup> que analiza la viabilidad del uso de las escorias de SiMn en la fabricación de hormigón.

En este estudio se evaluaron las propiedades tanto estructurales y microestructurales, como de resistencia, de un hormigón con el 100 % de árido reciclado procedente del machaqueo de la escoria de SiMn (como árido fino (arena) y árido grueso (grava), a partir de la proporción teórica<sup>140</sup> óptima de cemento, arena, grava y agua estimada. Concretamente, se ensayó sobre un hormigón con las siguientes características: 325,1

---

<sup>139</sup> Moisés Frías, M.ª Isabel Sánchez de Rojas, Ignacio Menéndez. *Viabilidad de escorias de SiMn como árido de reciclado en hormigones*. Ministerio de Educación y Ciencia. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 2004.

<sup>140</sup> Proporción óptima teórica en volumen relativo de los áridos que constituyen la mezcla cuya curva granulométrica se adapta aproximadamente a la curva de Bolomey.

kg/m<sup>3</sup> de cemento, relación agua/cemento 0,63, consistencia fluida y compactación mediante picado con barra.

Según los resultados obtenidos, la escoria de SiMn cumple las exigencias químicas en relación con el contenido de azufre total, sulfatos solubles, cloruros, sulfuros y cal libre. No presenta inestabilidad al hierro, ni muestra fenómeno de expansión de acuerdo con las normas UNE-EN 1744-1<sup>141</sup> y ASTM D4792<sup>142</sup>. Tampoco produce reacción árido-álcali según la norma UNE 146508<sup>143</sup>.

En cuanto a sus exigencias físico-mecánicas, la escoria de SiMn presenta alta resistencia al desgaste de los Ángeles. El valor obtenido es muy inferior (LA=17,9) al especificado en la *Instrucción de Hormigón Estructural* (LA≤40). Los valores de absorción de agua obtenidos para la escoria fueron de 2,14 y 2,24% respectivamente; valores que cumplen con la exigencia de la instrucción (<5) para su empleo como áridos. El coeficiente de forma obtenido para la escoria como árido grueso se sitúa en el límite fijado por la instrucción. Este coeficiente podría mejorar sustancialmente controlando la toma de muestra. La escoria de SiMn presenta valores altos de resistencias a compresión en probetas 4x4x4 cm, cuyo valor medio se sitúa en 146,4 Mpa. El ensayo de resistencia a ciclos hielo/deshielo mediante el ensayo de sulfato magnésico ha dado como resultado una pérdida de masa de 11,5%, valor inferior al máximo permitido en la instrucción (máx. 18%).

El estudio concluye que la elaboración de un hormigón<sup>144</sup> con el 100% de árido (fino y grueso) de escoria de SiMn obtiene una resistencia media de 38,2 Mpa, valor considerado muy bueno, además de que, según la caracterización microestructural, los hormigones con escoria de SiMn presentan matrices densas y homogéneas. Se constata una baja porosidad, una distribución homogénea de los áridos y una buena adherencia entre la matriz cementante y la escoria, por lo que se considera que **la escoria de SiMn es apta para su uso como árido (fino y grueso) en la fabricación de hormigones convencionales**. No obstante, se señala que, para hormigones con prestaciones especiales, se necesitarían estudios adicionales

### 6.4.3 Otros usos

Como materia prima en la fabricación de productos de la construcción:

- a) Fabricación de cemento (como adición activa)

Según la documentación facilitada por Ferroatlántica, la escoria de SiMn presenta propiedades puzolánicas. Las puzolanas son materiales que contienen sílice y/o alúmina que no son cementosas en sí, pero que cuando son molidos finamente y se mezclan con cal y agua, propician que la mezcla fragüe y se endurezca. Se dividen

---

<sup>141</sup> UNE-En 1744-1:2010+A1:2013. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.

<sup>142</sup> ASTM D4792. Standard Test Method for Potencial Expansion of Aggregates from Hydration Reactions.

<sup>143</sup> UNE 146508:2018. Ensayo de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero.

<sup>144</sup> En el ensayo indican las siguientes proporciones: cemento 13 %, arena (escoria SiMn) 33%, grava (escoria SiMn) 54%, agua 205 litros

en puzolanas naturales y artificiales, las primeras son activas por sí mismas, mientras que las artificiales necesitan de un tratamiento de activación<sup>145</sup>.

Por tanto, la condición imprescindible para que un material tenga propiedades puzolánicas es que este material posea capacidad de reaccionar con el hidróxido cálcico liberado durante la reacción de hidratación del cemento para dar lugar a fases similares a las producidas durante la hidratación del cemento Portland, generando matrices más densas, compactas y con mayor durabilidad frente a ambientes agresivos, en definitiva, con una mayor resistencia.

El cemento según la norma UNE EN 197-2011<sup>146</sup>, es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado en agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

Se fabrica a partir de una mezcla de clínker y yeso, que actúa como regulador del fraguado, además de una serie de correctores que mejoran sus propiedades.

A su vez, el clínker se obtiene a partir de la homogeneización y molienda de una serie de minerales, que son principalmente carbonatos como calizas o margas (>90%) encargadas de aportar CaO, fundentes como arcillas o pizarras (10%) encargados de aportar los óxidos que contribuyen a la formación de la fase líquida, y adiciones correctoras de la composición, como la arena encargada de conseguir las proporciones precisas de óxidos. El material resultante se denomina "crudo" que se introduce en el horno de cemento donde sufre una serie de reacciones a altas temperaturas (1.500°C) para formar el clínker.

El clínker se mezcla con el yeso y se introduce en los molinos para su molienda. Una vez alcanzada la finura deseada, el producto que se obtiene es el cemento. En esta etapa, se pueden añadir otros compuestos denominados correctores como cenizas volantes, escorias de alto horno, caliza, humo de sílice o puzolanas que influyen especialmente en el proceso de fabricación y que pueden mejorar o modificar las características físicas y/o químicas del cemento.

En la siguiente tabla se indican los límites aproximados entre los que oscila la composición en óxidos de las materias primas del clínker, siendo los cuatro primeros óxidos los componentes activos, mayoritarios o principales del cemento Portland y los restantes, secundarios, minoritarios o no deseados:

---

<sup>145</sup> Rojas et Frías. *Uso integral de residuos en la fabricación de nuevos cementos. Parte 1. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*. [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732009000300001](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732009000300001).

<sup>146</sup> UNE-EN 197:2011. *Cemento. Parte 1. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*.

**Tabla 6.4.3-1. Composición del clínker<sup>147</sup>.**

| Composición                                       | %       |
|---|---------|
| Cal [CaO]   | 60-67   |
| Sílice [SiO <sub>2</sub> ]                        | 17-25   |
| Alúmina [Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]         | 3-8     |
| Óxido de hierro [Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ] | 0,5-6   |
| MgO   | 0,1-4   |
| Na <sub>2</sub> O-K <sub>2</sub> O                | 0,4-1,3 |
| SO <sub>3</sub>                                   | 0,1-2,5 |
| TiO <sub>2</sub>                                  | 0-0,5   |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    | 0-0,3   |

El cemento final es la suma de los componentes mayoritarios y minoritarios, más el yeso necesario para controlar el fraguado y los aditivos. Los componentes minoritarios se emplean en una proporción no superior al 5 % en masa y los aditivos no pueden exceder el 1 % (UNE EN 197-2011<sup>148</sup>).

Según la bibliografía revisada por EMGRISA, los residuos pueden emplearse en dos fases diferentes del proceso productivo del cemento. Una de ellas es en la fase de preparación del crudo, para la obtención del clínker, en la que son necesarios ciertos minerales que contienen Ca, Si, Fe, Al y otros elementos químicos.

La otra fase es en la de molienda del clínker con las adiciones de cemento y el regulador del fraguado (yeso), junto con los aditivos de molienda para dar lugar al cemento. En esta fase, como adiciones se pueden emplear materiales que mejoran algunas de sus propiedades, como la docilidad, la retención de agua, la durabilidad, la resistencia mecánica, la resistencia a los sulfatos, la resistencia al hielo-deshielo, etc.

<sup>147</sup> *Estudio de investigación de morteros con sustitución de escorias siderúrgicas utilizados en el revestimiento interior de tubos de fundición. Estudio Fin de Grado Universidad de Cantabria. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energías. 2017.*

<sup>148</sup> *UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.*



#### 6.4.3.1 Viabilidad técnica de las escorias de silicomanganeso. como materia prima en la fabricación de productos de construcción

- a) Fabricación de cemento (como adición activa)
  - **Documentación facilitada por Ferroatlántica**

La documentación facilitada por Ferroatlántica incluye varios estudios<sup>149,150,151</sup> que analizan la viabilidad del uso de las escorias de SiMn **como adición activa para la fabricación de cemento**, evaluando sus características químicas, físicas, mecánicas y de durabilidad en base a la normativa aplicable, cuyas principales conclusiones se resumen a continuación.

Según estos estudios, la escoria de SiMn analizada presenta una naturaleza sílico-alumínico cálcica, similar a los materiales puzolánicos e incluso a la de un cemento Portland, con un contenido de MnO del 10 %. Mineralógicamente, está formada por diferentes silicatos cristalinos, principalmente akermanita (silicato de Ca y Mg), estando presentes también otros silicatos como los magnésicos, potásicos y cálcicos, así como óxidos y sulfuros de manganeso y potásicos.

Respecto a la actividad puzolánica, la reacción de la escoria de SiMn con la cal tiene un comportamiento puzolánico comprendido entre el humo de sílice y la ceniza volante durante los primeros 28 días de reacción, dos de los materiales permitidos como adición en la norma UNE-EN 197<sup>148</sup> que regula el cemento. La actividad puzolánica puede verse reducida por la presencia de manganeso, aunque si se realiza una adecuada molienda su utilización como adición al cemento es viable.

Los estudios valoraron también el comportamiento de la escoria de SiMn en una matriz de cemento Portland, teniendo en cuenta las recomendaciones de la normativa española vigente (UNE-EN 197-1:2011<sup>152</sup>). Para ello, partiendo de un cemento patrón designado como CEM I 42,5 R, se prepararon distintas mezclas, sustituyendo el cemento por diferentes porcentajes de escoria de SiMn (5%, 15 %, 21 % y 30 %), concluyéndose, respecto a las exigencias químicas, que los cementos con escorias de SiMn (en los porcentajes ensayados) cumplen con los requisitos recogidos en la norma. Para llevar a cabo estos ensayos la escoria de SiMn se llevó a una finura Blaine de 4.569 cm<sup>2</sup>/g.

---

<sup>149</sup> Viabilidad de escorias de SiMn como adición activa al cemento Portland. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 2004.

<sup>150</sup> Moisés Frías, M. Isabel Sánchez de Rojas, Ignacio Menéndez. Comportamiento de cementos Portland con adiciones de escoria de SiMn. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 2005.

<sup>151</sup> Moisés Frías, M. Isabel Sánchez de Rojas. Estudio de las propiedades químico y físico-mecánicas de matrices de cemento elaboradas con altos porcentajes de escorias de SiMn como adición activa. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 2004.

<sup>152</sup> UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

En relación con las exigencias físicas (tiempo de principio de fraguado y estabilidad de volumen), la incorporación de escorias de SiMn reduce considerablemente el agua de consistencia normal de las pastas de cemento, tanto más cuanto mayor es el contenido de escoria en el cemento.

Por otra parte, en los cementos elaborados con hasta un 15 % de escoria de SiMn no se modifica el tiempo de inicio de fraguado con respecto al cemento de referencia, mientras que incorporaciones entre el 21 % y 30 % de escoria lo retrasan en torno a 30 minutos.

En relación con el ensayo de calor de hidratación, los cementos con escorias disminuyen ligeramente el calor desarrollado en la matriz cementante. Finalmente, no se observa inestabilidad de volumen en las pastas de cemento elaboradas con escorias de SiMn.

Respecto a las exigencias mecánicas, los morteros con escorias experimentan una pérdida de resistencia a compresión respecto al mortero patrón a 7 días de curado, siendo mayor esta pérdida cuanto mayor es el porcentaje de escorias de SiMn. Sin embargo, esta pérdida es cada vez menor a medida que se incrementa el tiempo de curado, **obteniéndose a 90 días de curado, resistencias a compresión similares a las del mortero de referencia**. Este comportamiento estaría relacionado con la presencia de propiedades puzolánicas en la escoria de SiMn. A pesar de ello, estos morteros cumplen con las exigencias mecánicas de resistencias normales a 28 días de curado.

El comportamiento mecánico mostrado por la escoria de SiMn sería comparable al de las cenizas volantes en las mismas condiciones de trabajo.

En base a lo anterior, teniendo en cuenta las características químicas, mineralógicas, puzolánicas, así como el cumplimiento de la normativa de referencia, **los estudios concluyen que la escoria de SiMn es apta como adición activa para la fabricación de cementos comerciales tipo II hasta una mezcla del 30 %**. Teniendo en cuenta que la normativa actual de cementos comerciales no contempla este tipo de residuo industrial en su fabricación, **debería adicionarse como componente minoritario hasta un 5% en peso de cemento hasta que se homologue su utilización como componente principal**.

Así mismo, la documentación facilitada por Ferroatlántica incluye varios artículos científicos en los que se realizan diferentes ensayos de las escorias de SiMn que concluyen que estas escorias son adecuadas para la producción de cemento, especialmente si son llevadas a una determinada finura. En relación con su elevado contenido en Mn se concluye que no tiene influencia en su actividad hidráulica a largo plazo.

Por otra parte, aunque se señala que los cementos con este tipo de escoria tienen buena resistencia a ambientes agresivos, se recomienda la necesidad de más estudios que evalúen la exposición a largo plazo en este tipo de ambientes.

- ***Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico manganése. Clément Houzé. Université de Paris. 2014***

Con objeto de disponer de más información, EMGRISA ha revisado varios documentos, entre los que destaca este estudio francés cuyo objetivo principal es evaluar la posible reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la

producción de cemento Portland al sustituir una determinada proporción de clínker en el cemento o el hormigón, por adiciones ricas en elementos que contengan calcio y una baja asignación de CO<sub>2</sub>, como son las escorias siderúrgicas. En los cementos mixtos, este tipo de escorias puede cumplir esta función sustitutiva como en el caso de la escoria de alto horno<sup>153</sup>, conocida por su buen rendimiento en el campo de los materiales de construcción

Así, en este estudio se analizan las propiedades de otro tipo de escorias, como son la escoria de convertidor de la industria siderúrgica y la escoria de silicomanganeso de la industria de producción de ferroaleaciones, con el objeto de evaluar, bajo diferentes aspectos, su posible valorización en el campo de los materiales cementantes, en comparación con las propiedades de la escoria granulada de alto horno (escoria permitida como adición en la norma UNE-EN 197<sup>148</sup>).

Para ello, se evaluó la reactividad de estas escorias, sus mecanismos de hidratación en sistemas de escoria/cemento a partir de su caracterización química, mineralógica y microestructural y se realizó un estudio ambiental tanto de las escorias como de los sistemas cementantes, con el fin de evaluar el comportamiento de los elementos potencialmente contaminantes con respecto a la lixiviación. Este enfoque ha contribuido a la mejora de los conocimientos científicos sobre ambos tipos de escorias.

Este trabajo de investigación demuestra que las escorias de convertidor y de SiMn pueden ser valorizadas como materiales alternativos en la ingeniería de carreteras para la fabricación de ligantes hidráulicos para todo tipo de aplicaciones (capas de relleno, lechos de carreteras, caminos forestales, etc.). En el caso concreto de la escoria de SiMn, el trabajo indica que parece que su comportamiento es similar al de la escoria de alto horno, por lo que a continuación se comparan las propiedades de ambas.

En relación con su composición, la escoria de SiMn, como la de alto horno, es un material amorfo, rico en calcio, silicio y óxidos de aluminio, calcio y magnesio. Su alto contenido de fase vítrea se acerca al 100% y su contenido de sílice (35%) se aproxima al de la escoria de alto horno (entre un 32 % y 37 %). Sin embargo, difiere en su menor contenido de óxido de calcio (20%) y en su mayor contenido de óxido de manganeso (hasta un 15%) y bario, frente al de la escoria de alto horno. Según el documento francés, este elevado contenido en Mn puede afectar a la estructura/resistencia a corto plazo al formar hidróxidos de manganeso, reduciendo así su actividad hidráulica, aunque se estabiliza a largo plazo. Se indica también que **sería interesante continuar estudiando el efecto de estos elementos en su reactividad y las consecuencias en los sistemas de cementación a base de escoria.**

---

<sup>153</sup> La escoria de alto horno cristalizada puede utilizarse como árido para hormigón o mezclas asfálticas según las normas europeas (EN 13043, EN 13242, EN 12620). También puede utilizarse como materia prima para la lana de roca. La escoria de alto horno vitrificada molida se emplea principalmente como aditivo para los aglutinantes hidráulicos según la norma [NF EN 15167-1, 2006] o en la fabricación de hormigón, morteros o lechadas según la norma [NF EN 206-1]. La escoria granulada de alto horno se utiliza en la producción de cemento común de tipo CEM III (hasta un 95% de escoria de alto horno) según [NF EN 197-1, 2001]. La escoria vitrificada puede ser valorizada como una adición mineral según [NF P 98-107, 2009] para la aplicación de base de pavimento. También se utiliza como arena o en la industria del vidrio como fuente de alúmina y sílice.

En cuanto a la granulometría, las escorias de SiMn son demasiado gruesas en su fase inicial, necesitando una molienda mínima de 1 h para llegar a una finura aceptable (6.600 de finura Blaine<sup>154</sup>) y poder ser empleada en un sistema con cemento<sup>155</sup>, aunque se recomienda más tiempo para mejorar esta finura y sus propiedades. Los materiales generalmente utilizados como componentes de aglutinantes hidráulicos tienen un tamaño de grano fino. El tamaño de partícula de estos materiales varía alrededor de un diámetro medio de 10  $\mu\text{m}$  con una finura de 4.000 Blaine. Por lo que para ser lo más reactivas posibles durante su uso, las escorias que pretendan emplearse en cementos deberían estar al menos en este rango granulométrico.

En el estudio también se indica que las escorias de SiMn contienen una cantidad importante de residuos insolubles inertes, que podrían reducirse modificando el tratamiento de la escoria a la salida del horno con un enfriamiento más rápido de la escoria para reducir la fracción de cuarzo presente en la escoria.

En relación con su comportamiento en los sistemas cementantes, la escoria de SiMn se trata de un material hidráulico latente y su función en la formulación de los aglutinantes hidráulicos es asegurar la resistencia mecánica del cemento. En consecuencia, la escoria de SiMn podría valorizarse como adición en la fabricación de aglutinantes de cemento con la adición de un agente básico para activar su hidratación.

Las propiedades mecánicas de la escoria de SiMn, utilizada como sustituto del cemento, son comparables a las propiedades de la escoria de alto horno y cercanas a las del cemento Portland. Los hidratos formados por la escoria de SiMn son también del mismo tipo que los formados por la escoria de alto horno. En este trabajo se evaluaron las propiedades de sistemas de cemento ternarios (cemento, escoria de SiMn y escoria de convertidor) concluyendo que la activación de la escoria de SiMn por la escoria del convertidor debe ser más fuerte que la de la escoria del alto horno. Esta activación puede lograrse añadiendo más escoria de convertidor que escoria de SiMn, o incorporando cemento Portland en la formulación del mortero.

A partir del 10% de cemento, el contenido de escoria de convertidor o de escoria de SiMn no tiene efecto sobre la resistencia mecánica a la compresión. Se ha demostrado que existe una amplia gama de composiciones ternarias en las que la resistencia mecánica puede ser adecuada para su uso como aglutinante hidráulico de carreteras, independientemente de la escoria hidráulica latente utilizada. Por ejemplo, en el caso del uso de escoria de SiMn, una formulación compuesta de 30% de escoria de convertidor, 10% de cemento y 60% de escoria de SiMn logra el mismo rendimiento mecánico.

---

<sup>154</sup> El tamaño de partícula o la finura de un cemento en  $\text{cm}^2/\text{g}$  o  $\text{m}^2/\text{kg}$ ; normalmente se determina a partir de ensayos de la permeabilidad del aire utilizando un dispositivo conocido como permeámetro de Blaine. La finura afecta la velocidad de hidratación (fraguado) y a los requerimientos de cantidad de agua, retardador y dispersante.

<sup>155</sup> Los materiales generalmente utilizados como componentes de aglutinantes hidráulicos tienen un tamaño de grano fino. En uso o en la literatura, el tamaño de partícula de estos materiales varía alrededor de un diámetro medio de 10  $\mu\text{m}$  con una finura de 4.000 Blaine. Por lo que para ser lo más reactivas posibles durante su uso, las escorias que pretenden emplearse en cementos deberían estar al menos en este rango granulométrico.

## b) Fabricación de clínker

Se ha identificado una experiencia a nivel industrial<sup>156</sup> llevada a cabo desde el año 2018 hasta el 2020 entre las instalaciones que poseen Ferroatlántica y CEMEX en Monzón (Aragón), en el que se ha demostrado la viabilidad técnica del uso de la escoria de SiMn como materia prima en la fabricación de clínker como fuente de óxido de calcio y otros componentes, estableciendo ciertos condicionantes de carácter técnico.

Concretamente, en las pruebas realizadas en el laboratorio se encontraron dos limitaciones a la hora de introducir las escorias como materias primas en el horno. Un alto contenido en Mn reduce la viscosidad de la fase líquida, la dimensión de los cristales de alita (compuesto que se forma en el clínker y que aporta resistencia al cemento) y la resistencia en las edades iniciales. Además, el Mn aporta un tono rojizo al clínker que puede afectar al color final del cemento (siendo este un parámetro controlado en normativa).

A partir de estas pruebas y, a pesar de las posibles limitaciones, se inició un consumo regular de las escorias de SiMn a finales de julio de 2019, comenzando con una dosificación de un 1% de escoria en el crudo y estimando un límite de dosificación del 2-3 % para que no afecte ni al color ni a la resistencia del clínker y cemento. Finalmente, se han fijado las siguientes especificaciones en la escoria de SiMn para este uso:

- % MnO < 8 %
- % Humedad < 5 %
- Tamaño: no se requiere porque en las cementeras se puede ajustar el tamaño de la escoria

### **Conclusiones. Viabilidad técnica de la escoria de silicomanganeso.**

La viabilidad técnica de la escoria de SiMn como árido alternativo, ha sido justificada para diversas aplicaciones a través de estudios técnicos que garantizan el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa de aplicación, bajo unas determinadas condiciones.

En relación con el uso **como árido en aplicaciones no ligadas**, el estudio desarrollado por el CEDEX concluye que es posible el uso de las escorias de SiMn **como zorra para la construcción de firmes**, habitualmente empleada para **constituir capas granulares de base/subbase, pero limitando su uso únicamente a firmes de categoría de tráfico T3, T4 (firmes de tráfico bajo), y bajo unas determinadas condiciones.**

Según los resultados obtenidos en el estudio, parece requisito indispensable que la escoria de SiMn sea mezclada con otro tipo de materiales (en al menos un 25 % de árido fino) para poder cumplir la especificación establecida en el PG3 para el azufre o se someta a un proceso adecuado de machaqueo o cribado o se mezcle con árido fino para poder cumplir los husos granulométricos y la resistencia a la fragmentación.

La especificación de la resistencia a la fragmentación, medida a través del coeficiente de desgaste de Los Ángeles, únicamente se cumple si se emplea el criterio para áridos siderúrgicos que establece el PG-3, que permite un valor superior en 5 unidades y siempre y cuando su composición granulométrica se adapte al

---

<sup>156</sup> <https://www.rqueerre.com/construccion/cemex-ferroglobe-caso-practico-de-economia-circular/>

huso granulométrico ZAD20 establecido en dicha norma. Para adaptarse a dichos husos, se requiere la mezcla de la escoria con árido fino o una adecuada trituración. Pese a lo expuesto anteriormente, el estudio señala que su limpieza, ausencia de plasticidad y elevado rozamiento interno pueden compensar que la resistencia a la fragmentación se encuentre cerca del límite de la especificación.

En relación al azufre, pese a que el estudio señala que, en función del bajo contenido de azufre soluble en agua y ácido obtenidos, así como las bajas concentraciones de sulfato detectadas en el lixiviado de la escoria, no se aprecia riesgo durante el empleo de la escoria de SiMn tratada ni para el medio ni a elementos constructivos, concluye que esta especificación podría cumplirse mediante la mezcla de la escoria de SiMn con, al menos, un 25% de árido fino natural.

Finalmente, en el estudio del CEDEX se indica que la escoria de SiMn puede emplearse como árido para suelo en explanadas, se entiende que cumpliendo las especificaciones como zahorra.

En el caso del uso **como árido en aplicaciones ligadas**, los estudios confirman la viabilidad técnica de la escoria de SiMn para su uso como árido en la fabricación de hormigones, pudiendo utilizarse hasta un 100 % de árido (fino y grueso) de escorias de SiMn para la fabricación de hormigones convencionales, ya que se cumplen tanto las propiedades estructurales como de resistencia y estabilidad, así como las exigencias químicas establecidas en los estándares y normativa que los regulan.

Para el uso **como materia prima en la fabricación de productos de construcción**, los estudios confirman la viabilidad técnica de la escoria de SiMn tratada como adición activa en la fabricación de cemento y como materia prima para la fabricación de clínker

Los estudios facilitados confirman que la escoria de SiMn tratada es apta para su uso como adición activa en la fabricación de cementos tipo II en un porcentaje máximo del 30 % aunque dichos estudios recomiendan adicionarlas como componente minoritario hasta un 5% en peso de cemento hasta que se homologue su utilización como componente principal en la normativa correspondiente. Adicionalmente, la bibliografía consultada considera que, para poder ser empleada en un sistema cementoso, la escoria deber ser llevada a una finura aceptable (6.600 de finura Blaine).

Por otra parte, pruebas recientes a nivel industrial han demostrado el éxito en el uso de la escoria de SiMn como materia prima en la fabricación de clínker como fuente de óxido de calcio y otros componentes, aunque estableciendo ciertos condicionantes de carácter técnico. Concretamente, se recomienda una dosificación máxima de la escoria de SiMn en la fabricación del clínker del 3% para evitar problemas de carácter técnico, y a su vez, un contenido máximo de MnO en las escorias del 8% y del 5% en humedad.

En la siguiente tabla se resume la información disponible para cada una de las posibles aplicaciones de las escorias de SiMn tratadas, señalando aquellas aplicaciones justificadas por estudios técnicos, los posibles usos finales de cada aplicación y las posibles limitaciones de viabilidad.

Tabla 6.4-1. Resumen aplicaciones no ligadas de la escoria de SiMn

| Aplicación y normativa de referencia | Estudio técnico | Escenario de aplicación              | Destinos  | Aplicabilidad y limitaciones de uso   |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|---|---|
| Zahorra PG-3 Art.510                 | Sí              | Con cobertura totalmente impermeable | <p>Construcción de firmes de carreteras</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ En construcción de firmes (base, subbase)</li> <li>○ Como material granular para base/subbase de vías peatonales, ciclistas y pistas deportivas</li> </ul> | <p>Aplicable a la categoría de tráfico T3, T4 estipuladas en el PG-3, solo para partículas vítreas y en ningún caso para tráficos elevados, <b>siendo requisito imprescindible su mezcla con otro tipo de materiales, en al menos un 25%</b>, o un adecuado proceso de cribado y machaqueo para poder cumplir con las especificaciones definidas en el pliego relativas al contenido de azufre (&lt;1%) y el huso granulométrico (ZAD20).</p> |

Tabla 6.4. 2. Resumen aplicaciones ligadas escorias de SiMn

| Aplicación                     | Estudio técnico | Destinos  | Aplicabilidad y limitaciones de uso   |
|--------------------------------|-----------------|---|---|
| Fabricación de Hormigón EHE-08 | Sí              | <p>Hormigón estructural (estructural, preparado, prefabricados, cajones para diques).</p> <p>Hormigón no estructural (de limpieza, de relleno).</p> <p>Hormigón para carreteras (pavimentos de hormigón, magro vibrado)</p> | <p>Como material granular con el 100% de árido (fino y grueso) de escoria de SiMn</p> |

Tabla 6.4. 3. Resumen otros usos escorias de SiMn

| Aplicación                            | Estudio técnico | Destinos  | Aplicabilidad y limitaciones de uso   |
|---------------------------------------|-----------------|---|---|
| Fabricación de cemento <sup>157</sup> | Sí              | <p>Como material puzolánico en la fabricación de cementos comerciales tipo II hasta una mezcla del 30 %, aunque se recomienda adicionar en un máximo de un 5% mientras no se homologue su uso en normativa.</p> | <p>Teniendo en cuenta que la normativa actual de cementos comerciales no contempla este tipo de residuo industrial en su fabricación, <b>debería adicionarse como componente minoritario hasta un 5% en peso de cemento hasta que se homologue su utilización como componente principal.</b></p> <p>Finura aceptable (6.600 de finura Blane según estudio francés) con molienda mínima de 1 h o superior.</p> |

<sup>157</sup> Aplicación no incluida específicamente en el Decreto 100/2018, de de 20 de diciembre, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria, que únicamente incluye el uso de la escoria de SiMn para la fabricación de Clinker.

| Aplicación             | Estudio técnico                 | Destinos  | Aplicabilidad y limitaciones de uso  |
|------------------------|---------------------------------|---|--|
| Fabricación de clínker | Sí (pruebas a nivel industrial) | Como materia prima en la fabricación de clínker | Las escorias que pretendan emplearse en cementos deberían tener al menos un diámetro medio de 10 micras.<br><b>Dosificación máxima de la escoria de SiMn en el cemento del 3% y un contenido máximo en las escorias del 8% en MnO y del 5% en humedad.</b> |

## 6.5 CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y SOBRE LA SALUD HUMANA

La escoria de SiMn se encuentra registrada<sup>158</sup> bajo el *Reglamento (CE) nº 1907/2006 (REACH)*. Sus códigos de identificación son los siguientes:

**Tabla 6.5-1. Códigos de identificación de las escorias de silicomanganeso.**

| Nombre       | NºCAS      | NºEC      | Nº REGISTRO REACH     |
|--------------|------------|-----------|-----------------------|
| Escoria SiMn | 69012-33-5 | 273-733-9 | 01-2119440597-32-0000 |

Ferroatlántica apunta que la escoria de SiMn, además de cumplir con los requisitos del proceso de registro conforme al *Reglamento REACH*, no cumple con los criterios para ser clasificado como peligroso conforme al *Reglamento (CE) nº 1272/2008 sobre la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP)* en función de los numerosos ensayos realizados. Esta característica se encuentra respaldada por distintos estudios<sup>159,160</sup> consultados cuyos resultados se encuentran en la misma línea.

### 6.5.1 Uso como árido en aplicaciones no ligadas

#### ○ **Resultados analíticos sobre el lixiviado. Ferroatlántica**

Debido a sus características físicas y químicas, y al tratarse de un residuo sólido, la lixiviación es el principal sistema potencial de emisión contaminante de la escoria de SiMn, es decir, la emisión de los componentes que forman la escoria hacia los suelos, las aguas superficiales y las aguas subterráneas.

A continuación, se presentan los resultados analíticos sobre el lixiviado de la escoria de SiMn facilitados por Ferroatlántica correspondientes a diferentes empresas productoras de ferroaleaciones de silicomanganeso. Los resultados se han comparado con los valores límite establecidos en el *Decreto 100/2018, de 20 de*

<sup>158</sup> <https://echa.europa.eu/es/registration-dossier/-/registered-dossier/15228>

<sup>159</sup> *International Manganese Institute (IMNI). Slags, silicomanganese manufacturing (SiMn slag). 2012.*

<sup>160</sup> *INERCO. Caracterización Físico-Química y Ecotoxicológica de las Escorias de Sílico-Manganeso Almacenadas en los Montones de la Escombrera Sur de las Instalaciones de Hidronitro Española, S.A. 2011.*



diciembre, de Cantabria, única CA que incluye estas escorias y cuyos límites se basan en la normativa de admisión en vertedero de residuos inertes<sup>161</sup>.

También se han considerado los valores límite establecidos en la normativa VLAREMA de Flandes, que regula las condiciones de uso de las escorias procedentes tanto de la industria ferrosa como no ferrosa como material de la construcción, entre las que podrían incluirse las escorias de SiMn. No obstante, hay que señalar que esta comparación es solo orientativa al haberse obtenido mediante métodos de ensayos diferentes.

**Tabla 6.5.1-1 Comparación resultados del lixiviado con ciertos valores de referencia (mg/kg). Escoria SiMn.**

| Parámetro | Valores lixiviado escoria SiMn |             |                | Valores en normativa autonómica* | Valores en otras normativas* |
|-----------|--------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|------------------------------|
|           | A Coruña 2014                  | Aragón 2014 | Cantabria 2012 | Cantabria <sup>162</sup>         | Flandes <sup>163</sup>       |
| Antimonio | <0,039                         | <0,050      | <0,06          | 0,06                             | -                            |
| Arsénico  | <0,1                           | <0,1        | <0,2           | 0,5                              | 0,8                          |
| Bario     | 0,33                           | 0,27        | <1             | 20                               | -                            |
| Cadmio    | <0,01                          | <0,0005     | <0,04          | 0,04                             | 0,03                         |
| Cromo     | <0,1                           | <0,05       | <0,5           | 0,5                              | 0,5                          |
| Cobre     | <0,1                           | <0,05       | <0,5           | 2                                | 0,5                          |
| Mercurio  | <0,001                         | <0,002      | <0,01          | 0,01                             | 0,02                         |
| Plomo     | <0,1                           | 0,09        | <0,5           | 0,5                              | 1,3                          |
| Molibdeno | <0,1                           | <0,05       | <0,5           | 0,5                              | -                            |
| Níquel    | <0,1                           | <0,05       | <0,4           | 0,4                              | 0,75                         |
| Selenio   | <0,039                         | <0,05       | <0,1           | 0,1                              | -                            |
| Zinc      | <0,2                           | <0,5        | 1,6            | 4                                | 2,8                          |
| Cloruro   | <10                            | 7,2         | 41             | 800                              | -                            |
| Fluoruro  | <2                             | <2          | <10            | 10                               | -                            |
| Sulfato   | <20                            | 86          | 32             | 1.000                            | -                            |

\* España emplea el ensayo de cumplimiento, UNE-EN 12457-4, basado en un ensayo dinámico de equilibrio sobre un material de tamaño entre 4 y 10 mm, sometiéndolo a agua desmineralizada durante 24 h, a un L/S de 10. Flandes emplea el ensayo de percolación en columna.

Tal y como se observa en la tabla anterior, la mayor parte de los valores detectados en el lixiviado de las escorias se encuentran por debajo del límite de cuantificación del laboratorio, excepto el bario, el plomo y los cloruros y, en todo caso, se encuentran por debajo de los valores límite de referencia.

<sup>161</sup> Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

<sup>162</sup> Decreto 100/2018, de 20 de diciembre, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria.

<sup>163</sup> Besluit van de Vlaamse Regering tot vaststelling van het Vlaams reglement betreffende het duurzaam beheer van materiaalkringlopen en afvalstoffen. 17 Februari 2012.

- ***Estudio Green Engineering and Resources Group y Centro de Investigación del Medio Ambiente. Comportamiento Ambiental de las Escorias de Fundición, acería y ferroaleaciones para su valorización en diferentes aplicaciones. 2015.***

El estudio facilitado por Ferroatlántica tiene por objetivo el análisis del comportamiento ambiental de 5 tipos diferentes de escorias del sector siderúrgico, en base a ensayos de lixiviación, entre las que se encuentran las escorias de SiMn de Ferroatlántica generadas en Cantabria para su utilización como material granular en diferentes aplicaciones de construcción y obra civil.

Los ensayos se basaron en el sistema integral de evaluación de la norma europea UNE-EN 12920 *Caracterización de residuos. Metodología para la determinación del comportamiento durante el lixiviado de residuos en condiciones específicas*, además de considerar la premisa del *Decreto Holandés de Materiales de Construcción* de 1995, aplicada posteriormente en el *Libro Blanco para la minimización de residuos y emisiones: Escorias de acerías*, publicado por la Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco IHOBE (1999).

Esta metodología se basa en determinar el aporte al suelo, en un periodo de tiempo de 100 años, de los contaminantes presentes en las escorias (valores de inmisión), y compararlo con el aporte que produciría un cambio en la composición del primer metro de un suelo de referencia, igual al 1% (valor límite de inmisión).

Para ello, mediante los valores obtenidos en los ensayos de lixiviación se obtienen los valores de emisión y a partir de éstos, se calculan los valores de inmisión (aporte al suelo de contaminantes presentes en la escoria).

En los casos de utilización de escorias como material granular, el ensayo de lixiviación que más se aproxima a las condiciones reales es el ensayo de percolación o de columna (CEN/TS 14405). Debido a que estos resultados se obtienen en condiciones diferentes a las que se obtendrían durante la aplicación al suelo, se considera necesario corregirlos (mediante factores de corrección). Para ello, se necesita realizar ensayos complementarios que permitan obtener información sobre aquellos parámetros que influyen en el campo, la relación líquido-sólido L/S y las condiciones de pH.

De los ensayos realizados para cada tipo de escoria, se obtienen unos valores de emisión y unos factores de corrección. También se consideran diferentes escenarios que contemplan distintos tipos de impermeabilización que afectan a la infiltración (con o sin impermeabilización).

Como valor de referencia de composición del suelo, se consideró el valor VR90 para Cantabria, recogido en el estudio del Instituto Geológico Minero (IGME, 2011)<sup>164</sup>.

---

<sup>164</sup> *Niveles Genéricos de Referencia para protección de la salud humana de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad Autónoma de Cantabria 2010-2011*

La altura de la capa de escorias máxima permitida, se ha obtenido comparando la inmisión producida por las escorias (restándole la inmisión del suelo), con la inmisión máxima calculada a partir del valor de referencia del suelo, que se ha tomado el VR90 del estudio del IGME.

El estudio concluye que, para la mayoría de las escorias y escenarios de deposición, la altura de capa máxima que se puede depositar está limitada por un solo elemento, al que se ha denominado elemento crítico, y que difiere de un tipo de escoria a otra y depende también de los escenarios de deposición (con o sin impermeabilización).

En el caso de la **escoria de SiMn el elemento limitante es el Mo que determina una altura de capa máxima de 1,7 m de escoria, seguido del Hg**, debido a que los valores VR90 para Cantabria son muy bajos para ambos metales, aclarando que cuando se utilizan otros valores de referencia, los resultados mejoran.

En el estudio se realizó un análisis de sensibilidad de los resultados de afectación al suelo cuando se varían tanto los NGR de los suelos contemplando otros usos como el urbano o el industrial o contemplando los valores de fondo de otras regiones o teniendo en cuenta los valores de referencia VR95 y VR99.

Al utilizar los valores del VR90, del VR95 o del VR99, la restricción de altura máxima obtenida es de 1,7 m, 3,7 m y 16,5 m, respectivamente. En el caso de los NGR para suelo otros usos, urbano e industrial las restricciones calculadas son 1,7 m, y sin restricción para los usos urbano e industrial. Al utilizar los VR90 de los suelos de otras CCAA los resultados obtenidos son para Aragón y Cataluña, como para Cantabria 1,7 m; para Galicia 6,6 m y para la Comunidad de Madrid, con un mayor VR90 en el caso del molibdeno, de 15,9 m.

En el caso de un escenario en el que se ha **impermeabilizado con una capa de arcilla**, la infiltración se reduce a 6 mm/año, **por lo que en el intervalo de alturas analizado entre 1 y 40 m no se considera necesaria ninguna limitación para la aplicación de la escoria**. Por otra parte, en el Anexo I de dicho estudio, se presentan las gráficas de los resultados de los ensayos de disponibilidad (NEN 7341, 1995), de lixiviación en columna (CEN/TS 14405, 2002), y de equilibrio (UNE-EN 12457/1-4:2003<sup>165</sup>), comparados con los valores límite establecidos en la norma de admisión de residuos inertes en vertedero.

Por otra parte, teniendo en cuenta que las escorias de SiMn no se encuentran reguladas a nivel europeo y que su uso no está tan extendido como el de las escorias negras de acería, no se dispone de tanta información como en estas últimas. Es por ello que, con el fin de valorar qué parámetros podrían presentar mayor problemática desde el punto de vista ambiental, se han analizado los resultados de los ensayos de disponibilidad máxima facilitados y se ha realizado una comparativa de estas concentraciones máximas con los valores límite establecidos en normativa de protección de aguas subterráneas y superficiales.

Este análisis se ha realizado para obtener información orientativa de aquellos parámetros que podrían requerir mayor control (analizando los escenarios más conservadores y que no representan la situación real),

---

<sup>165</sup> UNE-EN 12457/1-4:2003. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos.

pero que se considera necesario al no disponer de datos específicos para las escorias de SiMn (salvo las analíticas facilitadas).

Respecto a la disponibilidad (máxima concentración que se podría liberar al medio), únicamente Se, Zn, Ni, Ba, Cr, Cloruros, Fluoruros y Sulfatos superan o alcanzan los valores de la normativa, teniendo en cuenta que no se disponen de valores límite para Mn y V. La concentración máxima disponible para siete elementos es inferior al límite del Decreto de escorias para declarar la escoria como valorizable, por lo que son elementos que, a priori, no van a sobrepasar dicho límite. Los elementos son el As, Cd, Cu, Hg, Pb, Mo, Sb. En ningún caso, las concentraciones alcanzadas en el equilibrio superan los valores establecidos en normativa.

Respecto a la comparativa con la protección de aguas, EMGRISA ha analizado los resultados de los ensayos de lixiviación disponibles comparando las mayores concentraciones detectadas para cada parámetro con los valores límite de protección establecidos en la normativa de Países Bajos para aguas subterráneas<sup>166</sup> y en la normativa española para aguas superficiales<sup>167</sup>. No obstante, cabe señalar que esta comparación constituiría el caso más desfavorable, teniendo en cuenta que las concentraciones en el lixiviado se van a diluir en dichas aguas.

En el caso de la normativa de Países Bajos se diferencian dos niveles, el nivel objetivo que corresponde a la calidad necesaria para la total funcionalidad del suelo o las aguas, el sostenimiento de la vida humana, animal y vegetal, y el nivel de intervención que corresponde a la contaminación que amenaza con impedir o impide seriamente la funcionalidad del suelo o las aguas. Por encima de este nivel, se considera que existe contaminación que generalmente requiere alguna forma de saneamiento o medidas de control para reducir los riesgos.

Así mismo, se diferencian dos niveles objetivo en aguas subterráneas, en función de la altura a la que se encuentre el nivel freático, por encima o por debajo de los 10 m. En este caso, se ha considerado el valor menos restrictivo de los dos. En la siguiente tabla se muestran los resultados de la comparativa:

**Tabla 6.5.1-2. Comparativa entre los resultados analíticos de la escoria de SiMn con la normativa empleada como referencia.**

| PARÁMETRO  | UNIDADES | RESULTADOS ESCORIA SIMN | NORMATIVA OTROS PAÍSES PAÍSES BAJOS |  | NORMATIVA ESPAÑOLA                        |
|------------|----------|-------------------------|-------------------------------------|--|---|
|            |          |                         | Nivel objetivo aguas subterráneas   | Nivel de intervención aguas subterráneas | NCA-MA <sup>168</sup> aguas superficiales |
| Bario (Ba) | mg/l     | 0,115                   | 0,05                                | 0,625                                    | -   |

<sup>166</sup> Dutch List. Circular de Remediación de Suelos de 2013, tabla 1, del Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente de Holanda.

<sup>167</sup> Real Decreto 817/2015, 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.

<sup>168</sup> Normas de Calidad Ambiental-Media Anual.

| PARÁMETRO         | UNIDADES   | RESULTADOS<br>ESCORIA SIMN | NORMATIVA OTROS PAÍSES<br>PAÍSES BAJOS  |   | NORMATIVA<br>ESPAÑOLA                           |
|-------------------|------------|----------------------------|---|---|---|
|                   |            |                            | Nivel objetivo<br>aguas<br>subterráneas | Nivel de<br>intervención<br>aguas<br>subterráneas | NCA-MA <sup>168</sup><br>aguas<br>superficiales |
| Antimonio (Sb)    | mg/l       | <b>0,00039</b>             | 0,00015                                 | 0,02  | -   |
| Arsénico (As)     | mg/l       | 0,00023                    | 0,01                                    | 0,06  | 0,05  |
| Cadmio (Cd)       | mg/l       | 0,00002                    | 0,0004                                  | 0,006   | 0,08-0,25<br>f(dureza)                          |
| Cromo (Cr)        | mg/l       | <b>0,0059</b>              | 0,0025                                  | 0,03  | 0,05  |
| Plomo (Pb)        | mg/l       | 0,00027                    | 0,015                                   | 0,075   | 0,0072  |
| Mercurio (Hg)     | mg/l       | <b>0,00011</b>             | 0,00005                                 | 0,0003  | 0,00007   |
| Níquel (Ni)       | mg/l       | 0,00037                    | 0,015                                   | 0,075   | 0,02  |
| Cobre (Cu)        | mg/l       | 0,00081                    | 0,015                                   | 0,075   | 0,005-0,12<br>f(dureza)                         |
| Manganeso<br>(Mn) | mg/l       | 0,023                      | -                                       | -   | -   |
| Selenio (Se)      | mg/l       | <b>0,0015</b>              | -                                       | -   | 0,001   |
| Molibdeno (Mo)    | mg/l       | <b>0,0077</b>              | 0,005                                   | 0,3   | -   |
| Zinc (Zn)         | mg/l       | 0,0026                     | 0,065                                   | 0,8   | 0,030-0,5<br>f(dureza)                          |
| Cobalto (Co)      | mg/l       | 0,00007                    | 0,02                                    | 0,1   | -   |
| Vanadio (V)       | mg/l       | 0,613                      | -                                       | -   | -   |
| Cloruro           | mg/l       | 6,70                       | 100                                     | 100   | -   |
| Fluoruro          | mg/l       | 0,19                       | -                                       | -   | 1,7   |
| Sulfato           | mg/l       | 26,96                      | -                                       | -   | -   |
| pH                | 9,32-10,12 | -                          | -                                       | -   | -   |

Tal y como se aprecia en la tabla anterior, para el Ba, Sb, Cr, Hg y Mo se supera el nivel objetivo establecido en la norma holandesa, pero en ningún caso se supera el valor de intervención. Es decir, aunque no se superan los valores que requerirían una actuación, la superación de los valores objetivo conlleva la necesidad de llevar a cabo un control y seguimiento de estas concentraciones.

Respecto a las aguas superficiales, el contenido de Hg y Se en el lixiviado de las escorias de SiMn (0,00011 y 0,0015 mg/l) son los únicos elementos que superarían el valor límite fijado por la normativa de referencia (0,00007 y 0,001 mg/l).

Así mismo, en los ensayos realizados, se dejó envejecer la muestra a la intemperie durante 6 meses, recogiendo una muestra de lixiviado cada mes. El manganeso y el níquel alcanzan su máxima concentración de equilibrio con la escoria menos envejecida (primer mes), así como el cobalto (segundo mes). La mayor parte de los metales, Ba, Cd, Cr, Cu, Pb, Mo, V, Sb alcanzan su máxima concentración el 5º mes y el zinc en el 6º mes. El arsénico y el mercurio la alcanzan el tercer mes. Respecto a los oxoaniones, el cloruro lixivía de forma rápida durante el primer mes, mientras que el fluoruro y los sulfatos alcanzan su máxima concentración de equilibrio al tercer mes de envejecimiento. Por ello, no se ha evidenciado influencia del

envejecimiento en la movilidad de los elementos, no pudiéndose generalizar un comportamiento o tendencia frente a la lixiviación.

Finalmente, en el Anexo II de dicho estudio se muestran los resultados del ensayo de dependencia de pH. El comportamiento frente al valor de pH varía de un elemento a otro, si bien, el comportamiento predominante en los metales como el Mn, As, Ba, Co, Cr, Ni, Pb, Sb, Zn, así como en el fluoruro es el de aumentar la lixiviación cuanto más ácido sea el medio, presentando el mínimo a pH superiores a 8, tal y como se recoge en la siguiente tabla para éstos y otros elementos.

**Tabla 6.5.1-3. Ensayo de dependencia de pH. Escoria de SiMn.**

| Parámetro  | Rango de pH en el que se produce la máxima lixiviación |
|--|--|
| Arsénico (As), Bario (Ba), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Manganeso (Mn), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Selenio (Se), Antimonio (Sb), Zinc (Zn), Fluoruros | 4-5  |
| Molibdeno (Mo), Cloro (Cl)   | 4 y 8  |
| Cadmio (Cd)  | 6-7  |
| Sulfatos   | 4-6 y 9-12   |
| Cobre (Cu), Vanadio (V), Mercurio (Hg)   | 10-12  |

Los resultados evidencian cambios en el comportamiento del lixiviado de la escoria en función del pH, aumentando cuanto más ácido es el medio en la mayoría de los elementos.

### 6.5.2 Uso como árido en aplicaciones ligadas y como materia prima en la fabricación de productos de construcción

No se han identificado estudios específicos que hayan evaluado el comportamiento ambiental de la escoria de SiMn tratada como árido en la fabricación de hormigón (aplicación ligada). No obstante, las conclusiones de los estudios consultados en los que se ha evaluado el comportamiento de la escoria de SiMn en la fabricación de cementos, pueden considerarse extrapolables.

- ***Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico manganése. Clément Houzé. Université de Paris. 2014***

Tal y como se ha comentado anteriormente, EMGRISA ha revisado varios documentos, entre los que destaca este estudio francés<sup>169</sup> que además de analizar la reactividad de varios tipos de escorias y sus mecanismos de hidratación en sistemas de cemento, evalúa también los posibles impactos ambientales derivados de su uso.

El estudio lleva a cabo una caracterización fisicoquímica de la escoria de SiMn, así como varios ensayos de lixiviación en los que se compara su comportamiento en una matriz de cemento frente a otro cemento sin

<sup>169</sup> Clément Houzé. *Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico manganése. Universidad de París. 2014.*

adiciones, con objeto de llegar a una conclusión sobre el posible impacto ambiental de las escorias de SiMn dentro de una matriz. Las pruebas de lixiviación se realizaron con tres tipos de muestras: materiales secos, materiales hidratados triturados y materiales hidratados monolíticos.

El estudio se llevó a cabo en diferentes fases. La **primera fase** consistió en analizar la composición elemental de la escoria seca y de una muestra de cemento sin adiciones, así como de sus respectivos lixiviados, con objeto de evaluar el comportamiento de cada material y compararlo con los requisitos tomados como referencia (Guía SETRA<sup>170</sup> y Decisión del Consejo de eliminación de residuos inertes en vertedero<sup>171</sup>).

Las concentraciones de los lixiviados de la escoria de SiMn estaban por debajo de los valores límite empleados como referencia y, por lo tanto, las escorias anhidras no presentarían ninguna amenaza para el medioambiente respecto a la liberación de elementos para el uso de los materiales como aglutinantes hidráulicos de carreteras, aplicación ligada. Cabe señalar que, en el cemento común sin adiciones, la concentración de bario superó ligeramente el valor de referencia.

Respecto al contenido total en la escoria seca, el estudio señala que las escorias de SiMn, al igual que las de alto horno, presentan concentraciones más bajas de metales pesados que otras escorias, especialmente en el caso del cromo y vanadio. El cemento común presenta un contenido de cromo (49 mg/kg) similar al de la escoria de SiMn y de vanadio (127 mg/kg) bastante superior al detectado en dicha escoria.

Respecto a la conductividad, el cemento CEM I presenta un valor muy superior al de las escorias de SiMn, que indica que éste es muy soluble. En el caso de las escorias, un valor tan bajo de conductividad implica que hay muy pocas sales presentes en el eluato<sup>172</sup> y, por lo tanto, que parece ser particularmente resistente a la prueba de lixiviación.

En la **segunda fase** del estudio se comparó la composición de un cemento con adición de escoria de SiMn (relación 50/50) respecto a la de un cemento sin adición de escorias CEM I tras 28 días de hidratación. Concretamente, en el cemento con escorias se realizaron dos caracterizaciones: una sobre una muestra triturada y otra sobre material no triturado (forma monolítica) durante un tiempo más largo.

En el caso de la muestra de cemento triturada con adición de escoria de SiMn, el estudio indica una liberación de bario ligeramente superior al límite impuesto en la Guía SETRA de referencia.

En el caso de los ensayos sobre la muestra monolítica, los únicos elementos traza detectados tanto en los cementos con adiciones como en el cemento común fueron Ba y V, todos los valores inferiores a 0,2 ppm. Los principales elementos liberados fueron el Ca, K y Na y no se detectó cromo.

---

<sup>170</sup> "Acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs en technique routière pour les laitiers sidérurgiques", Environmental Assesment, SETRA French Technical Department for Transport, Road and Bridges. 2012.

<sup>171</sup> Decisión 2003/33/CE del Consejo, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.

<sup>172</sup> Solución obtenida por medio de una prueba de lixiviación en laboratorio.

Los niveles medidos en las pruebas de lixiviación de 24 horas en monolitos son mucho más bajos que los obtenidos en las pruebas con el material triturado. Por lo que se señala que los ensayos de lixiviación del monolito representan mejor la realidad del ligante hidráulico para carreteras que las muestras de material anhidro o hidratado triturado, que produce un incremento de la liberación de elementos.

Finalmente, en la **tercera fase** se realizó una caracterización del cemento triturado almacenado al aire libre y rociado regularmente con agua durante 9 meses, así como de su lixiviado. Este proceso de envejecimiento se llevó a cabo para carbonatar la pasta en la medida de lo posible con el fin de cambiar la microestructura del sistema cementoso y observar el impacto del envejecimiento del cemento en la lixiviación de elementos metálicos.

En este escenario, se produce una mayor liberación de compuestos como el cromo (no se diferenció entre cromo total y cromo VI), en ambos tipos de cemento (con y sin adiciones): con concentraciones entre 1 y 1,3 mg/kg en los eluatos de las escorias de SiMn y en la propia muestra de cemento sin adiciones (1,1 mg/kg), debido a los procesos de carbonatación de la escoria.

Se explica que se desconoce si pudiera liberarse más cromo con mayor tiempo de envejecimiento. La liberación de vanadio es también mayor, pero se mantiene por debajo de 1 mg/kg. Hay que tener en cuenta que la Guía SETRA indica que el ensayo de lixiviación debe realizarse sólo sobre los materiales, no sobre el ligante hidráulico fabricado.

- **Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)**

Tal y como se analiza en profundidad en el apartado 8 del presente estudio, la *Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio*, limita el contenido de cromo (VI) en el cemento y en los preparados que contienen cemento a 2 ppm en el caso de aquellas actividades en la que existe la posibilidad de contacto con la piel con el fin de proteger la salud de las personas.

Según el IECA esta limitación, recogida también en el *Anexo XIV del Reglamento REACH punto 47. Compuestos de Cr VI*, se refiere al mortero normalizado elaborado con una arena CEN con un contenido nulo de cromo. Por tanto, con objeto que dicha limitación se cumpla, los áridos utilizados en la elaboración de hormigón, entre los que podrían incluirse las escorias, deben tener un contenido nulo (0%) de cromo (VI) soluble en agua, tanto si se utilizan como un componente (árido) o como adición (de forma molida).

Debido a la elevada variabilidad en la composición de las escorias, el IECA señala la necesidad de controlar este contenido en cromo (VI) lote por lote, ya que esta variabilidad tiene su origen en las materias primas y el contenido en cromo de las chatarras utilizadas en su caso.

Aunque el documento del IECA se centra en las escorias de acería y, de manera concreta, en la escoria negra (EAF-C) y blanca, sus conclusiones respecto al contenido de cromo (VI) pueden extrapolarse al resto de escorias del presente estudio.



## Conclusiones. Consideraciones ambientales y sobre la salud humana de las escorias de silicomanganeso

La escoria de silicomanganeso se encuentra registrada bajo el *Reglamento REACH* y *no cumple* con los criterios para ser clasificada como peligrosa conforme al *Reglamento sobre la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP)*.

En relación a su potencial de lixiviación, para cada uno de los parámetros de partida se han analizado los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización básica (disponibilidad, de percolación en columna y de dependencia de pH) disponibles para esta escoria, así como los de la comparativa realizada entre las concentraciones detectadas en el lixiviado de la escoria con los valores límite de la normativa de protección para aguas subterráneas<sup>173</sup> en Países Bajos y para aguas superficiales<sup>174</sup> en la normativa española, pese a constituir el escenario más desfavorable posible.

Según los resultados de los estudios de caracterización de la escoria y de su lixiviado, las concentraciones de metales pesados detectadas en el lixiviado son inferiores a los valores límite considerados como referencia (norma de admisión de residuos inertes en vertedero).

Según los resultados del ensayo de disponibilidad, la concentración máxima disponible para As, Cd, Cu, Pb, Mo, Sb, Hg es inferior a los valores límite establecidos en el Decreto de escorias de Cantabria para declarar la escoria como valorizable (que se corresponden con los valores límite de admisión de residuos inertes en vertedero), por lo que son elementos que, a priori, no van a sobrepasar dicho límite. No obstante, Hg supera el valor límite de la normativa de protección de aguas superficiales y Ba, Sb, Cr, Hg y Mo superan el valor objetivo de aguas subterráneas. En función de lo anterior, los elementos menos problemáticos en estas escorias se corresponderían con los elementos As, Cd, Cu y Pb.

Por el contrario, para los elementos Se, Zn, Ni, Ba, Cr, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, la concentración máxima disponible es superior al valor límite establecido en el Decreto de escorias, por lo que, en el escenario más desfavorable en el que lixiviasse toda la concentración de metal disponible en la escoria, podría superarse dicho valor límite.

Los estudios analizados que estiman la afección al medio ambiente mediante la metodología holandesa de determinar el aporte al suelo en un período de tiempo de 100 años concluyen que para los escenarios de deposición de escoria de SiMn sin impermeabilización, el elemento limitante es el Mo que determina una altura máxima de aplicación de la escoria de 1,7 m. En los escenarios de deposición con impermeabilización no existe limitación de ningún tipo para la aplicación de las escorias.

Por todo lo anterior, se considera que **el uso seguro de las escorias de SiMn en aquellas aplicaciones no ligadas, se podría garantizar siempre y cuando se estableciesen medidas adicionales de control**, como el

---

<sup>173</sup> Dutch List. Circular de Remediación de Suelos de 2013, tabla 1, del Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente de Holanda.

<sup>174</sup> Real Decreto 817/2015, 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.

establecimiento de condicionantes y restricciones de uso, valores límite de composición y de lixiviación, condiciones de aplicación y control de calidad.

En cuanto a los usos como materia prima en la fabricación de productos de construcción, los resultados obtenidos en el lixiviado de las muestras de cemento con adición de escoria de SiMn durante los ensayos realizados sobre muestras trituradas e hidratadas (estudio francés), no parecen concluyentes, al observarse el mismo comportamiento en el lixiviado de las muestras de cemento sin adiciones. En concreto, tanto en el lixiviado de la muestra de cemento con escoria de SiMn como en el de la muestra sin adiciones, se detecta un ligero incremento en la liberación de cromo y bario.

Pese a que un ensayo en el que se analiza el comportamiento del sistema cementante triturado envejecido durante 9 meses se produce una mayor liberación de compuestos como el cromo o el vanadio en los eluatos debido a los procesos de carbonatación de la escoria, se puede considerar que las concentraciones detectadas son poco significativas, encontrándose entre 1 y 1,3 ppm. Además, teniendo en cuenta que este escenario es muy conservador y no representa en ningún caso una aplicación ligada, estos resultados no se consideran representativos.

En este sentido, el estudio concluye que los ensayos de lixiviación sobre muestras monolíticas representan mejor la realidad del ligante hidráulico para carreteras que las muestras de material anhidro o hidratado triturado, ya que en este último se produce un incremento en la liberación de elementos. En los ensayos con muestra monolítica, los únicos elementos traza detectados tanto en los cementos con adiciones como en el cemento común, fueron Ba y V, todos los valores inferiores a 0,2 ppm. Los principales elementos liberados fueron el Ca, K y Na y no se detectó Cr.

Por todo lo anterior, se podría considerar que, de manera similar a las escorias de acero, no se prevé la generación de impactos adversos al medio ambiente y a la salud humana cuando la escoria de SiMn se emplee en aplicaciones ligadas o como materia prima en la fabricación de productos de construcción.

Afirmación en línea con lo expresado en el *Decreto 100/2018, de 20 de diciembre*, de valorización de escorias de Cantabria en el que se establece que los límites de lixiviación podrán no ser de aplicación si se utilizan en la fabricación de hormigón o cemento o la normativa de Flandes que no establece valores límite de lixiviación para usos ligados.

Aunque no son esperables impactos adversos al medio ambiente y la salud humana derivados del uso de las escorias de SiMn en aplicaciones ligadas o en aquellos usos como materia prima en la fabricación de productos de construcción, debe controlarse el contenido de cromo (VI), limitado en 2 ppm en el cemento y en los preparados que contienen cemento según la normativa de referencia.

## 7. ESCORIA DE COBRE

En 2016, la producción de cobre refinado en la UE se situó en 2,6 millones de toneladas, lo que representa el 12% de la producción global. Los principales centros de producción están situados en Alemania, Polonia, España, Suecia, Finlandia, Bélgica y Bulgaria.

La evolución del sector español del cobre refleja un aumento considerable en los ritmos productivos debido a la entrada en funcionamiento de grandes instalaciones de fundición y refino electrolítico durante los años 90, lo que sitúa a las fundiciones de nuestro país entre las primeras de Europa y del mundo por su capacidad de fundición.

Dentro del panorama español en la producción de cobre destaca la empresa Atlantic Copper, tercera mayor fundición y refinería de cobre de Europa y la única en España<sup>175</sup>. En 2019, en su complejo metalúrgico ubicado en Huelva, se fundieron 1.011.141 toneladas de concentrado de cobre, materia prima fundamental, que llega a Huelva procedente de minas de varios continentes. En Atlantic Copper se refunden también hasta 30.000 toneladas/año de cobre usado en diversas formas, como tubos e hilos de cobre, granulado, en virutas industriales, monedas, etc.<sup>176</sup>

En cuanto a la generación de escorias de cobre, cabe señalar que se producen entre 2 y 3 toneladas de escorias de cobre por cada tonelada de cobre fabricada, lo que constata la alta generación del residuo<sup>177</sup>. A continuación, se presentan los últimos datos de generación de escoria de cobre según las declaraciones ambientales de Atlantic Copper disponibles en su página web<sup>178</sup>.

**Tabla 7-1. Producción de silicato de hierro (escoria de cobre). Atlantic Copper.**

| Año          | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Cantidad (t) | 536.602 | 615.150 | 518.893 | 676.346 | 620.794 | 671.883 | 631.911 | 658.611 | 623.043 |

Los códigos LER asociados a este tipo de escorias se especifican a continuación:

- 10. "Residuos inorgánicos de procesos térmicos"
- 10 06. " Residuos de la termometalurgia del cobre"
- 10 06 01. "Escorias (primera y segunda fusión)"

<sup>175</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME). *Panorama Minero 2017*.

<sup>176</sup> <https://copperalliance.es/sobre-nosotros/industria-cobre/>

<sup>177</sup> Valderrama, González, Santander & Zazzali. *Recuperación de Cobre Contenido en Escoria de Cobre Mediante Flotación. 2018*.

<sup>178</sup> [www.atlantic-copper.es](http://www.atlantic-copper.es)

## 7.1 PROCESO PRODUCTIVO

La metalurgia del cobre puede ser primaria y/o secundaria, entendiendo como metalurgia primaria la producción de cobre a partir de minerales o concentrados de minerales y secundaria la producción de cobre a partir de materias primas secundarias como chatarras o residuos de otros procesos metalúrgicos.

Así mismo, en función del mineral de partida hay dos vías de producción del metal diferentes; la vía pirometalúrgica a partir de sulfuros que producen ánodos y cátodos de cobre, y la vía hidrometalúrgica a partir de óxidos, que producen directamente cátodos<sup>179</sup>.

A continuación, se detalla el proceso de producción de cátodos por vía pirometalúrgica, por ser la vía empleada por la empresa que solicitó la consideración de la escoria de cobre como subproducto:

### - Almacenamiento y secado de concentrados

La materia prima básica empleada es el concentrado de cobre. Los minerales <sup>(180)</sup> más comunes encontrados en los concentrados de cobre son la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), aunque pueden estar presentes otros minerales como la bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), calcosita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelina ( $\text{CuS}$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). Químicamente los concentrados fundidos contienen un 20-30% de cobre, 25-35% de hierro y 25-35 de azufre.

El concentrado de cobre se almacena en diferentes áreas cubiertas y se transporta mediante cintas transportadoras cubiertas que minimizan la contaminación difusa por partículas.

Los concentrados de cobre con una humedad del 7 al 9% se secan hasta el 0,2%, cifra de especificación de entrada de la siguiente etapa. El secado se lleva a cabo por un secador rotativo de gases calientes que dispone de una inyección de nitrógeno gas que evita la combustión del concentrado.

### - Horno "flash" de fusión de concentrados

El proceso de fusión "flash", consiste principalmente en oxidar los concentrados de cobre en una corriente de aire enriquecido con oxígeno y sílice. La oxidación se realiza en el interior de una cámara cilíndrica en donde el concentrado y el aire enriquecido son inyectados por un quemador. En la cámara se alcanzan temperaturas de hasta 1.250 °C, generándose un baño fundido con dos capas diferenciadas, mata y escoria.

Los productos obtenidos del proceso "flash" son, por tanto:

- Mata: Producto principal fundido, también denominado eje, contiene un 62% de Cu en la forma  $\text{Cu}_2\text{S}$ , además de FeS e impurezas entre las que se encuentran el arsénico, el antimonio, el plomo o el zinc.

<sup>179</sup> Juan Carlos Sarmentero Regueira. *Impacto de la Logística Inversa en el Mercado del Cobre en España*. Universidad Politécnica de Cataluña. Trabajo Final del Máster en Ingeniería de Recursos Naturales. 2010.

<sup>180</sup> <http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/capitulo13.pdf>.

- Escoria: Contiene hierro oxidado (FeO) y óxidos del fundente con hasta un 2% de Cu, por ello es enviada a tratamiento para recuperar el cobre contenido.
- Gas caliente: Contiene entre un 10 y un 80% de SO<sub>2</sub>, es dirigido a una caldera de recuperación de calor y, una vez limpio de partículas en electrofiltros, se conduce a la planta de ácido sulfúrico.

#### - **Convertidor de mata**

La conversión de la mata es el proceso mediante el que se separan del cobre los restos de azufre, hierro y otros metales que acompañan a la mata en la escoria del horno "*flash*" y horno eléctrico. Los convertidores son equipos cilíndricos que se mueven haciéndolos girar por su eje de rotación en los cuales se añade la mata, aire enriquecido en oxígeno y sílice, logrando reacciones fuertemente exotérmicas de oxidación. Para contrarrestar el aumento de temperatura se añaden chatarras de cobre, esqueletos de electrolisis y otros materiales fríos. De nuevo, son tres los productos obtenidos en los convertidores:

- Cobre Blíster: Denominado también ampollado o anódico, tiene una pureza de 98-99,5% y su principal aplicación es la fabricación por vía electrolítica de cátodos de cobre.
- Escorias: Se envían al horno de arco eléctrico junto con las escorias del horno Flash.
- Gas caliente: Con un contenido entre 5 y 10% de SO<sub>2</sub> se enfrían en cámaras evaporativas y, tras pasar por electrofiltros, se conducen a la planta de ácido sulfúrico.

#### - **Horno de arco eléctrico**

El horno eléctrico tiene como función la recuperación del contenido máximo de cobre de las escorias procedentes del horno "*flash*", que trabaja en continuo, y de los convertidores que trabajan por lotes. La base de este proceso consiste en conseguir que la escoria se mantenga en estado fundido, de tal manera que se pueda decantar el cobre en forma de gotas. Para ello, es necesario que disminuya la viscosidad de la masa fundida, lo cual está directamente relacionado con la concentración de magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) en la escoria. La reducción de la magnetita se consigue con la utilización de coque obtenido en la calcinación o destilación seca del carbón mineral. La reducción produce óxido ferroso (FeO) que combinado con la sílice origina el silicato de hierro o escoria de cobre ((FeO)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) y sulfuro de cobre que se incorpora a la mata.

La energía necesaria para mantener el estado fundido del baño se aporta mediante la generación de un arco eléctrico entre el material depositado y tres electrodos, forzando el paso de corriente eléctrica a través del material fundido. Para ello, se introducen unos electrodos compuestos por anillos de acero inoxidable y pasta *Söderberg* que se va desgastando según se desgasta el electrodo.

La pasta es un derivado del petróleo, brea, mezclada con antracita que, a 200°C, sufre un reblandecimiento adaptándose a la forma del electrodo. Posteriormente, al bajar el electrodo, su temperatura aumenta hasta los 500-600 °C produciéndose un proceso de cracking que solidifica la pasta y hace que la resistividad eléctrica disminuya notablemente. A partir de esa temperatura la masa coquizada sufre una grafitización que mejora aún más la conductividad eléctrica.

Una vez más se obtienen tres productos:

- Mata: Con un 70% de cobre, se envía a los convertidores.
- Escoria: Es enfriada rápidamente por medio de una inyección de agua generando el silicato de hierro o escoria de cobre.
- Gas: Tras ser depurados por un lavador se envían a la atmósfera. Los lodos del lavador de gases constituyen óxidos de zinc comercializables.

- **Afino térmico y moldeo**

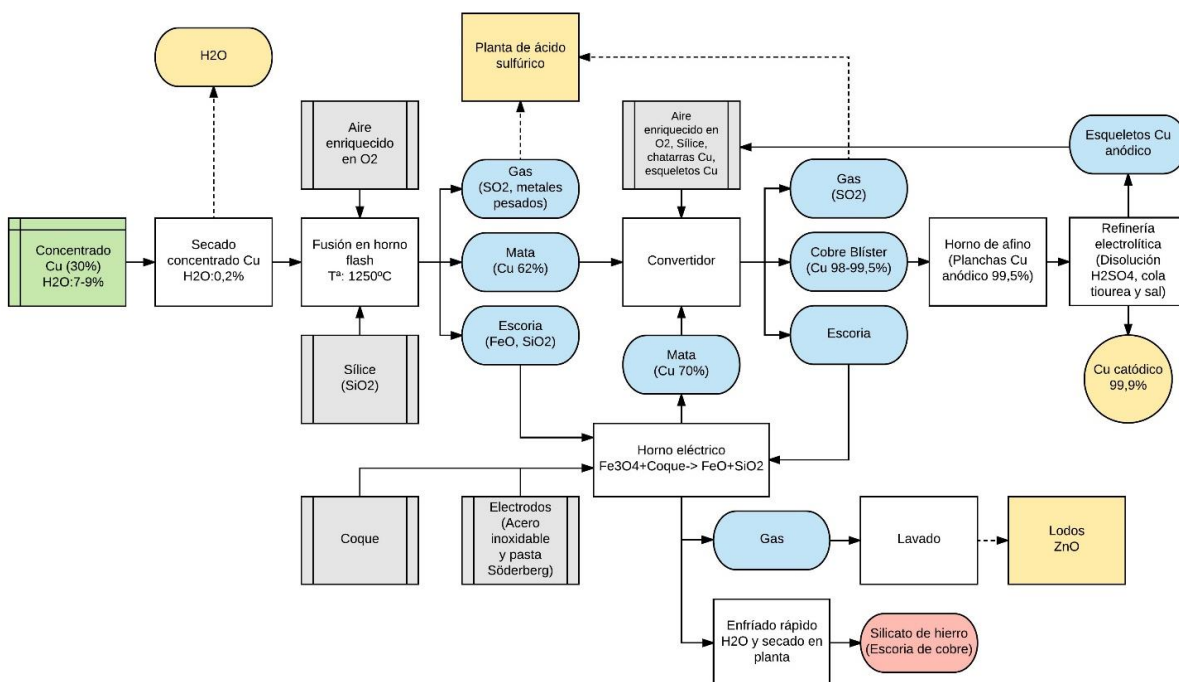
El cobre Blíster procedente de los convertidores se afina mediante los procesos de oxidación, en el que se eliminan los pequeños restos de azufre, y reducción, en el que se reducen los óxidos de cobre generados en el proceso de oxidación hasta niveles aceptables para la electrolisis. El cobre líquido afinado se moldea en ruedas que consiguen planchas de cobre anódico con una pureza del 99,5%.

- **Refinería electrolítica**

La mayoría de los ánodos de cobre procedentes del moldeo se refinan en cubas electrolíticas mediante un proceso en el que se hace pasar la corriente eléctrica a través del ánodo, disolviéndose el cobre en el electrolito (disolución de ácido sulfúrico aditivada con cola, tiourea y sal) para más tarde, precipitar sobre planchas de acero inoxidable conectadas al cátodo del conjunto obteniendo cobre catódico con una pureza del 99,9%. Los restos de cobre anódico no disueltos, denominados esqueletos, se recirculan a los convertidores como material frío.

Se adjunta esquema elaborado por EMGRISA que muestra el proceso de fabricación del cobre:

**Tabla 7.1-1. Proceso de producción de cobre catódico.**



## 7.2 CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN

La escoria de cobre es un material sólido, inorgánico, de color negro, marrón rojizo o gris, con las siguientes características:

**Tabla 7.2-1. Características de la escoria de cobre**

| Parámetro           | Atlantic Copper              |
|---------------------|------------------------------|
| pH (10% suspensión) | 6,5                          |
| Punto de fusión     | 1.027-1.341 °C               |
| Densidad relativa   | 3,11 - 4,2 g/cm <sup>3</sup> |
| Solubilidad         | Poco soluble                 |

Desde el punto de vista mineralógico, y según la bibliografía consultada<sup>181</sup>, los análisis concluyen que la escoria de cobre está compuesta fundamentalmente por fayalita (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), que es un ortosilicato de hierro de la familia de los olivinos, además de por óxido de hierro (FeO) como la magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). La composición de óxidos de la escoria varía fundamentalmente en función de la naturaleza de los minerales, de los concentrados, de los fundentes y de las condiciones de operación. Los principales óxidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 7.2-2. Principales óxidos presentes en la escoria de cobre.**

| Tipo de óxido     | Formulación                         | %     |
|-------------------|-------------------------------------|-------|
| Óxido de hierro   | FeO, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 30-40 |
| Óxido de silicio  | SiO <sub>2</sub>                    | 35-40 |
| Óxido de aluminio | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | < 10  |
| Óxido de calcio   | CaO                                 | <10   |

En relación con la composición química general de las escorias de cobre, éstas contienen principalmente silicato de hierro y proporciones de silicatos de aluminio y calcio, junto con trazas de metales en forma metálica formando parte de minerales o incluidos en las fases de silicato. Las estructuras cristalinas presentes, minoritarias, se consideran inertes<sup>182</sup>.

En la siguiente tabla se indica la composición de la escoria de cobre según distintas fuentes a las que se ha tenido acceso, donde se muestran también aquellos componentes minoritarios.

<sup>181</sup> Manuel Cruz Carrasco. Universidad de Málaga. Tesis Doctoral "Estudio de la Resistencia y Reología de Hormigones con Adición de Escorias de Cobre como Sustituto del Árido Fino". Málaga, 2014.

<sup>182</sup> Yaichi Esteban Andrés Pérez Mejías. Utilización de Escorias de Cobre de Codelco Ventanas como Agregado Pétreo para Tratamientos Superficiales Asfálticos Simples en la Región de Valparaíso. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso-Chile. Enero 2017.

**Tabla 7.2-3. Composición química de las escorias de cobre.**

| Parámetro     | M. Cruz<br>Carrasco**iError!<br>Marcador no definido. | Solicitud de subproducto<br>(2014) |         | Solicitud de subproducto<br>(2016) |        | Uds*** |
|---------------|---|------------------------------------|---------|------------------------------------|--------|--------|
|               |   | Marzo                              | Octubre | Mayo                               | Julio  |        |
| Hierro (Fe)   | 40-50*  | 43,40                              | 46,58   | 45,67                              | 45,06  | %      |
| Silicio (Si)  | 27-30*  | 14,31                              | 13,42   | 28,41                              | 29,91  | %      |
| Zinc (Zn)     | 7.000 - 15.000  | 18.700                             | 14.900  | 7.600                              | 13.300 | ppm    |
| Aluminio (Al) | 0 - 45.000*   | 15.900                             | 14.400  | 30.400                             | 26.000 | ppm    |
| Calcio (Ca)   | 0 - 18.000*   | 12.600                             | 5.900   | 14.000                             | 13.200 | ppm    |
| Azufre (S)    | 2.000 - 5.000   | 5.500                              | 6.200   | -                                  | -      | ppm    |
| Magnesio (Mg) | 2.000 - 8.000*  | 5.500                              | 2.400   | -                                  | -      | ppm    |
| Plomo (Pb)    | 800 - 2.000   | 5.000                              | 3.200   | -                                  | -      | ppm    |
| Níquel (Ni)   | 20-50   | 199                                | 54      | 152                                | 52     | ppm    |
| Cloro (Cl)    | <30   | 36                                 | <16     | -                                  | -      | ppm    |
| Selenio (Se)  | 10-50   | <20                                | <20     | -                                  | -      | ppm    |
| Cadmio (Cd)   | 30-160  | <20                                | <20     | -                                  | -      | ppm    |
| Bismuto (Bi)  | 90-150  | <20                                | <20     | -                                  | -      | ppm    |
| Cobre (Cu)    | -   | -                                  | -       | 10.500                             | 10.200 | ppm    |
| Arsénico (As) | -   | -                                  | -       | 852                                | 930    | ppm    |

\* Contenido de sus óxidos

\*\*Muestra de escorias de cobre procedentes de Atlantic Copper.

\*\*\* Se ha realizado la siguiente conversión:  $g/Tn = mg/kg = ppm = 0,0001\%$

Como puede apreciarse en la tabla anterior, la escoria de cobre posee un gran contenido en hierro y sílice procedente de sus componentes principales. Entre los metales pesados se evidencian concentraciones notables de cobre, zinc y aluminio y, en menor medida, arsénico y plomo.

Según la bibliografía consultada<sup>183</sup>, las escorias de cobre se caracterizan por contener pequeñas cantidades de compuestos como  $Al_2O_3$  y  $CaO$ . Otros compuestos como el  $MgO$ ,  $K_2O$  y  $S$  se presentan en cantidades mucho menores. Además, a menudo están enriquecidos en elementos metálicos como cobre, plomo y zinc, alcanzando concentraciones de hasta el 28%, 18% y 12%, respectivamente. Otros metales como el arsénico, el cromo y el níquel también pueden estar presentes, pero en cantidades mucho menores, que normalmente no superan el 0,1%.

Otros estudios<sup>184</sup> constatan la presencia de picos de arsénico, hasta en 1,25%, en la escoria de cobre en ciertos muestreos puntuales, e indican la necesidad de realizar un estudio ambiental que permita, no sólo conocer la presencia de arsénico en la escoria, sino también su catalogación como residuo no peligroso. No obstante, el promedio de presencia de arsénico en la escoria de cobre es inferior al 0,07%.

<sup>183</sup> Anna Potysz. *Copper Metallurgical slags: Mineralogy, bio/weathering processes and metal bioleaching*. PHD Thesis. Université Paris-Est. UNESCO-IHE. 2012-2015 PHD THESIS (2012-2015).

<sup>184</sup> Yaichi Esteban Andrés Pérez Mejías. *Utilización de Escorias de Cobre de Codelco Ventanas como Agregado Pétreo para Tratamientos Superficiales Asfálticos Simples en la Región de Valparaíso*. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso-Chile. Enero 2017.



### 7.3 TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE COBRE

El proceso de valorización de las escorias de cobre consta de ciertas etapas para garantizar calidades y tamaños óptimos del material granular resultante, con objeto de comercializarse para sus diferentes aplicaciones finales, detalladas en profundidad posteriormente en el presente estudio.

En función de la información disponible, la escoria de cobre no necesita ser tratada con objeto de alterar su composición química o las propiedades intrínsecas de la misma, por lo que no requiere etapas de maduración o envejecimiento, careciendo de fenómenos de expansividad. Tampoco se ha constatado la realización de una etapa de desmetalización, habitual en otro tipo de escorias.

- Almacenamiento, enfriamiento y secado

La escoria, una vez producida, se vierte en zonas de acopio donde puede ser lavada y, a su vez, enfriada. El enfriamiento puede ser rápido, si se realiza con agua, y lento, si se deja secar al aire<sup>185</sup>. El enfriamiento por aire produce escorias muy porosas, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo. Si se utiliza un chorro de agua a alta presión u otro sistema de enfriamiento, produce la granulación de la escoria en partículas de tamaño uniforme<sup>186</sup>. De esta forma, el contenido de vidrio puede ir desde el 75 al 95% para las escorias de cobre enfriadas bruscamente, es decir a través de un choque térmico, mientras que, en las enfriadas lentamente, éste puede disminuir hasta un 45%<sup>187</sup>.

La escoria, una vez lavada y enfriada, puede ser sometida a un proceso de secado mediante secador rotativo u otros, para eliminar la práctica totalidad de la humedad.

- Molienda, machaqueo y cribado

La escoria de cobre necesita un acondicionamiento granulométrico específico con objeto de alcanzar el tamaño óptimo de uso fijado por el receptor del material resultante, consistente en un machaqueo y un cribado posterior o simplemente mediante un único cribado, tal y como indica Atlantic Copper, cuyo proceso de acondicionamiento carece de la etapa de molienda.

### 7.4 APLICACIONES

Las líneas de investigación más importantes de las escorias de cobre para su utilización en ingeniería civil se centran fundamentalmente en el estudio del comportamiento de cementos y hormigones, y de sus

---

<sup>185</sup> Yaichi Esteban Andrés Pérez Mejías. *Utilización de Escorias de Cobre de Codelco Ventanas como Agregado Pétreo para Tratamientos Superficiales Asfálticos Simples en la Región de Valparaíso. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso-Chile. Enero 2017.*

<sup>186</sup> Documento BREF. *Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales No Férreos. 2005.*

<sup>187</sup> Carlos Cristóbal Hunt Recabarren. *Modelamiento del enfriamiento controlado de escorias de fusión de cobre. Universidad de Chile. 2017.*

propiedades puzolánicas. No obstante, también se constatan usos alternativos como balasto para líneas de ferrocarril, relleno, capas granulares de firme, áridos para la fabricación de mezclas bituminosas, morteros y hormigones, abrasivos, adición al clínker, entre otros<sup>188</sup>.

Según datos facilitados por Atlantic Copper, la escoria de cobre es comercializada en su totalidad para distintos fines que abarcan diversas aplicaciones. En la siguiente tabla se muestra el histórico de consumo de la escoria de cobre en Atlantic Copper desde el año 2011 para aquellas aplicaciones propuestas por la citada fundición. Se desconoce el destino del resto de la escoria comercializada:

**Tabla 7.4.-1. Producción y venta de silicato de hierro (escorias de cobre). Atlantic Copper.**

| Año             | Producción(t)  | Cementera (t)  | Relleno (t)  | Abrasivo (t) |
|-----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| 2011            | 536.602        | 100.353        | -            | 5.367        |
| 2012            | 615.150        | 157.201        | -            | 12.382       |
| 2013            | 518.893        | 153.884        | -            | 7.441        |
| 2014            | 676.346        | 185.364        | -            | 5.000        |
| 2015            | 620.794        | 176.125        | 2.751        | 8.855        |
| 2016            | 671.883        | -              | 2.605        | -            |
| <b>Promedio</b> | <b>606.611</b> | <b>154.585</b> | <b>2.678</b> | <b>7.809</b> |

Algunas de estas aplicaciones se constatan en el Documento BREF<sup>1869</sup> de referencia que indica que las escorias de cobre tratadas se pueden utilizar en proyectos de ingeniería civil, construcción de carreteras y aplicaciones similares, así como granalla (material abrasivo), ya que a menudo tienen propiedades superiores a las de los materiales alternativos utilizados para este uso.

A nivel internacional se ha identificado el uso de escoria de cobre en Flandes (Bélgica). Según la Agencia Pública de Residuos de Flandes (OVAM)<sup>189</sup> la escoria de cobre se reutiliza completamente en su región, un 10% como material abrasivo de chorro de arena y un 90% como material de construcción, principalmente como parte de la fracción de arena en la producción de hormigón, empleándolo en proporciones limitadas. En la siguiente tabla se muestra las aplicaciones presentadas en Flandes para la escoria de cobre, así como su idoneidad de uso:

**Tabla 7.4-2. Aplicaciones de la escoria de cobre. OVAM 2014.**

| Escoria de cobre                    | Tipo de uso    | Calidad del uso |
|-------------------------------------|----------------|-----------------|
| Asfalto                             | -              | -               |
| Hormigón de carretera               | -              | -               |
| Hormigón premezclado para edificios | Uso en estudio | Uso óptimo      |

<sup>188</sup> Manuel Cruz Carrasco. *Universidad de Málaga. Tesis Doctoral "Estudio de la Resistencia y Reología de Hormigones con Adición de Escorias de Cobre como Sustituto del Árido Fino"*. Málaga, 2014

<sup>189</sup> OVAM. *Gebbruiksmogelijkheden van grondstoffen volgens VLAREMA in of als bouwstof- een stand van zaken. Flandes. 2014.*

| Escoria de cobre                      | Tipo de uso     | Calidad del uso |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Elementos estructurales prefabricados | Uso en estudio  | Uso óptimo      |
| Bloques de hormigón                   | Uso tradicional | Uso adecuado    |
| Ligantes hidráulicos                  | Uso tradicional | Uso adecuado    |
| Cimientos                             | -               | -               |
| Sub-cimientos                         | Uso tradicional | Uso adecuado    |
| Drenaje                               | -               | -               |
| Relleno y terraplén                   | -               | -               |
| Otros                                 | -               | Uso óptimo      |

Como puede apreciarse en la tabla anterior, la utilización de la escoria de cobre como relleno no es uno de los usos prioritarios o considerados en Flandes, prevaleciendo aplicaciones en usos ligados tipo hormigón.

#### 7.4.1 Uso como árido en aplicaciones no ligadas de la escoria de cobre

Las aplicaciones no ligadas son aquellas en que los materiales granulares se colocan compactados en (sucesivas) capas para la ejecución de diversas unidades de obra civil, sin que se adicione conglomerante alguno. También se pueden incluir las aplicaciones en las que no se requiera su compactación como puede ser el caso, por ejemplo, de su aplicación como material abrasivo (granalla).

Según la documentación facilitada por Atlantic Copper, la escoria de cobre puede utilizarse en el proceso de elaboración de áridos, en sustitución de materiales de origen natural, para su uso en relleno de zanjas para instalación de tuberías

Según el artículo 332 del PG-3 el relleno localizado es la unidad que consiste en la extensión y compactación de suelos, procedentes de excavaciones o préstamos, en relleno de zanjas, trasdós de obras de fábrica, cimentación o apoyo de estribos o cualquier zona que, por reducida de su extensión, compromiso estructural u otra causa no permita la utilización de los mismos equipos de maquinaria con que se lleva a cabo la ejecución del resto de relleno, o bien exija unos cuidados especiales en su construcción.

Así mismo, el apartado 5.3 del artículo 332 del PG-3 diferencia específicamente el relleno de zanjas para instalación de tuberías.

Según la documentación consultada, en estas estructuras se puede prever una cama de apoyo de la tubería para evitar problemas de asentamientos que puede estar compuesta por una capa de arena o de otro material, como las escorias de cobre. El tipo y espesor de estos rellenos varía en función del material de la tubería: en casos de tuberías de PVC y acero se rellena hasta 20 cm por encima de la generatriz superior de la tubería y en el caso del hormigón armado 10 cm por encima de la generatriz superior. Posteriormente, se completa el relleno con material seleccionado hasta 30 cm por encima de la generatriz y se finaliza el relleno hasta la cota del terreno con un relleno ordinario.

#### 7.4.1.1 Viabilidad técnica de las escorias de cobre. Aplicaciones no ligadas.

La documentación facilitada por Atlantic Copper se corresponde con el estudio *Aplicación del silicato de hierro obtenido en el proceso industrial de la fundición de cobre*<sup>190</sup> realizado por el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, Atlantic Copper y la ETSI de Minas y Energía de la UPM, estudio que se ha tomado de referencia en varios de los siguientes apartados.

Según este estudio, el silicato de hierro (escoria de cobre) posee marcado CE conforme con el Reglamento de productos de la Construcción (RPC). En particular, dispone de un Certificado de Conformidad de Control de Producción en Fábrica por lo que se realizan todos los ensayos obligatorios para el mantenimiento de dicho marcado CE conforme con la norma de especificaciones armonizada *UNE-EN 13242:2003 "Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes"*.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de autocontrol que se realizan al silicato de hierro con relación al marcado CE, cuando se utiliza como árido, y los requisitos exigidos en la norma *UNE-EN 13242:2003*.

**Tabla 7.4.1.1-1. Ensayos autocontrol escoria de cobre. Solicitud de subproducto.**

| Norma                | Nombre  | Frecuencia    | 2013                   | 2014              | 2015              | 2016              | Valor límite  |
|----------------------|---|---------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
|                      |   |               | 1er sem/<br>2ºsem      | 1er sem/<br>2ºsem | 1er sem/<br>2ºsem | 1er sem/<br>2ºsem |               |
| UNE-EN 933-1:1998    | Determinación de la granulometría de las partículas | 1 / semana    | Realizado semanalmente |                   |                   |                   | -             |
|                      | Contenido total en azufre                           | 1 / año       | 2,2 / 0,8              | - / 0,1           | - / 0,4           | - / 0,1           | ≤2%           |
|                      | Sulfatos solubles en ácido                          | 1 / año       | 0,6 / 0,8              | - / 0,3           | - / 0,3           | - / 0,0           | ≤1%           |
| UNE-EN 1744-1:1999   | Desintegración del silicato bicálcico               | 2 / año       | Est.                   | Est.              | Est.              | Est.              | No desintegra |
|                      | Desintegración del hierro                           | 2 / año       | Est.                   | Est.              | Est.              | Est.              | No desintegra |
|                      | Estabilidad de volumen                              | 2 / año       | - / 1,6                | 1,1 / 1,3         | 0,0 / 0,0         | 0,1 / -           | ≤5%           |
| UNE-EN 1097-6:2014   | Determinación de la densidad de partículas          | 1 / año       | - / 3,8                | - / 3,7           | 3,8 / 3,7         | 3,7 / -           | 3,6-4,0 g/cm³ |
| UNE-EN 1097-6:2014   | Determinación de la absorción de agua               | 1 / año       | - / 0,2                | - / 0,3           | 0,2 / 1,0         | 0,3 / 0,3         | ≤0,5%         |
| UNE-EN 932-3/A1:2004 | Descripción petrográfica simplificada               | 1 cada 3 años | - / DP                 | -                 | -                 | -                 | -             |

Tal y como se aprecia en la tabla anterior, la escoria de cobre cumpliría los requisitos exigidos en la citada norma. El contenido en azufre de la muestra de primer semestre del año 2013, que supera ligeramente el límite permitido, no parece representativo en función de los contenidos del resto de muestras.

<sup>190</sup> M. A. Sanjuán, J.A. Suárez y P.Mora. *Aplicación del silicato de hierro obtenido en el proceso industrial de la fundición de cobre. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Atlantic Copper, S.L.U., ETSI Minas y Energía UPM. 2018.*

El estudio señala que el uso del silicato de hierro (escoria de cobre) permite reemplazar materiales de relleno tradicionales de origen natural que se suelen colocar como relleno de zanjas, terrenos, terraplenes, etc., y para la preparación de lechos o “camas” para acomodar y estabilizar las canalizaciones flexibles.

Con respecto a la instalación del silicato de hierro en zanja de tuberías, se indica que la cama de apoyo de la tubería flexible es necesaria para evitar problemas de asentamientos. Ésta puede formarse con una capa de silicato de hierro de 10 a 20 cm de espesor, en función del diámetro de la tubería. Hay que destacar que estas “camas” no son necesarias con tuberías rígidas como las de hormigón armado ya que tienen una resistencia estructural suficiente para resistir el asentamiento del material y los movimientos del terreno.

Así mismo, se han identificado otros estudios<sup>191,192</sup>, que indican que la escoria de cobre tiene un comportamiento similar a otros áridos, pudiéndose utilizar como material alternativo en la construcción de carreteras en diferentes aplicaciones de relleno, entre las que se cita el relleno de muros de contención o cimientos poco profundos.

Esta aplicación es confirmada por la *Guía Tecnológica. Directiva 96/61 relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Epígrafe 2.5. Metalurgia del cobre del Ministerio de Industria y Energía*, que señala su uso como relleno como una de las posibles aplicaciones de la escoria de cobre procedente de horno de arco eléctrico.

Se debe tener en cuenta el tamaño granulométrico de la escoria de cobre, ya que los materiales de relleno que se utilicen para el apoyo no deben tener partículas de tamaño superior a 40 mm para diámetros de tubería entre 200 y 600 mm, según indica la norma UNE-EN 1610:2016<sup>193</sup>.

#### 7.4.2 Otros usos de la escoria de cobre

##### Como materia prima en la fabricación de productos de construcción: Fabricación de clínker

Según la documentación facilitada por Atlantic Copper, la escoria de cobre se utiliza en las fábricas de cemento como corrector de hierro en la fabricación de clínker de cemento.

El principal componente del cemento es el clínker. Este material se produce a partir de materias primas naturales, como la caliza y la arcilla, que se muelen, homogeneizan y se introducen en un horno rotatorio, donde se cuecen a una temperatura de 1.450°C, necesaria para formar el nuevo compuesto. Está formado por una mezcla de silicatos, aluminatos y ferritoaluminatos de calcio y se fabrica a partir de la denominada harina de crudo en las siguientes proporciones:

---

<sup>191</sup> C. Lavanya, A. Sreerama, N.Darga Kumar. *A review on utilization of copper slag in geotechnical applications. Proceedings of Indian Geotechnical Applications. 2011.*

<sup>192</sup> K. Arun Kumar, Dr. A. Mahesh Babu. *Characteristics and Utilization of Copper Slag-Fly Ash Mix as Road Construction Material. Department and Utilization of Copper Slag-fly Ash Mix as Road Construction Material. 2017.*

<sup>193</sup> UNE-EN 1610:2016. *Construcción y ensayos de desagües y redes de alcantarillado.*

- 40-60% Silicato tricálcico o alita ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )
- 20-30% Silicato dicálcico o belita ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )
- 7-14% Aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- 5-12% Ferritoaluminato tetracálcico ( $4\text{Ca}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

La harina de crudo es una mezcla finamente pulverizada de distintos minerales y sustancias que, mezclados en proporciones adecuadas, permiten las reacciones de descarbonatación y sinterización que tienen lugar a lo largo del circuito aire-gases en el sistema torre de intercambio-horno. Los constituyentes del crudo tienen por objeto proporcionar las fases hidráulicamente activas y un óptimo tamaño de grano.

La composición de la harina de crudo se realiza a través del cálculo de los denominados módulos que establecen las proporciones en la que intervienen los cuatro óxidos mayoritarios,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Para el caso del óxido de hierro, se calcula el módulo de fundentes que establece la relación entre la cantidad de alúmina y óxido de hierro.

En algunos casos es necesario emplear "correctores" que aporten dichos elementos fundamentales. En la siguiente tabla se muestra la evolución histórica del consumo de los correctores de hierro más habituales empleados en las fábricas de cemento españolas según la información facilitada por Atlantic Copper:

**Tabla 7.4.2-1. Correctores de hierro en fábricas de cemento integrales de España (t).**

| Corrector de hierro                          | 2006          | 2007          | 2008          | 2009          | 2010          | 2011           | 2012           | 2013           | 2014           | 2015           |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Minerales de hierro                          | 283.41        | 282.502       | 489.241       | 429.750       | 176.606       | 136.652        | 199.405        | 154.524        | 149.893        | 171.577        |
| Piritas                                      | 115.121       | 93.975        | 45.856        | 45.628        | 49.599        | 43.010         | 12.042         | 14.100         | 14.056         | 18.152         |
| Pizarras                                     | 489.358       | 408.180       | 418.534       | 286.210       | 338.280       | 299.450        | 254.139        | 242.623        | 283.572        | 336.228        |
| Cascarilla de hierro                         | 74.315        | 62.928        | 74.757        | 64.256        | 101.641       | 66.565         | 17.632         | 13.559         | 17.695         | 39.919         |
| <b>Silicato de hierro (escoria de cobre)</b> | <b>90.489</b> | <b>68.346</b> | <b>42.778</b> | <b>33.228</b> | <b>84.636</b> | <b>100.353</b> | <b>157.201</b> | <b>153.884</b> | <b>185.364</b> | <b>176.125</b> |

### Material abrasivo

Según la documentación facilitada por Atlantic Copper, la escoria de cobre puede utilizarse como abrasivo mineral destinado a la preparación de superficies por chorreado, en sustitución de materiales como la arena de sílice, el óxido de aluminio fundido, la arena de olivino, la estauroлита o el granate.

Se conoce con el nombre de abrasivos, determinados materiales, naturales o artificiales, de gran dureza que, en forma de granos sueltos o aglomerados, se emplean para la limpieza o conformación de toda clase de materiales. Los abrasivos se proyectan o frotan sobre la superficie de la pieza que se trata de limpiar o conformar, y los diminutos cristales que los forman, arrancan partículas del material. Las partículas arrancadas, no tiene forma definida y además son de tamaño mucho más pequeño (0,001 mm). Los abrasivos no se emplean generalmente para arranques importantes de material, sino más bien, para operaciones de limpieza, acabado y pulimentado.

En la industria del chorreado superficial, el agente abrasivo que tradicionalmente se utilizaba era la arena de sílice, si bien durante las últimas décadas han aparecido ciertas restricciones al uso de este material a causa de los problemas que las partículas de dicho agente abrasivo ocasionan en la salud y en la seguridad de las personas. Este hecho ha fomentado la incursión en el mercado de otros agentes abrasivos, de origen natural o sintético, entre los que se encuentran la escoria de cobre, considerado como un material sustitutivo en el mercado mundial para aplicaciones de chorreado en seco<sup>194</sup>.

Según las fuentes bibliográficas consultadas, el tipo de abrasivo determina el costo y la efectividad de la limpieza con chorro abrasivo. Entre las propiedades determinantes del abrasivo constan el tamaño de la partícula y su medida uniforme, la forma de la partícula, la densidad, la dureza y la fragilidad.

#### 7.4.2.1 Viabilidad técnica de las escorias de cobre. Otros usos

##### Fabricación de clínker

Según indicaciones de Atlantic Copper, el silicato de hierro se utiliza para reemplazar a los correctores de hierro utilizados normalmente en la fabricación de clínker del cemento Portland, es decir, reemplazar a minerales de hierro como la limonita ( $\text{FeO}(\text{OH})\text{nH}_2\text{O}$ ) y la pirita ( $\text{FeS}_2$  (Disulfuro de hierro (II))), rocas como la pizarra y otros aportadores de hierro reciclado como la cascarilla de hierro y las cenizas de pirita.

Según la documentación facilitada, el cemento Portland común es un producto de construcción que está normalizado a nivel europeo en la norma de especificaciones armonizada UNE-EN 197-1 y reglamentado, tanto a nivel europeo (Reglamento de Productos de Construcción) a través del anejo ZA de la norma armonizada de especificaciones de cementos, como a nivel nacional mediante las Instrucciones del hormigón estructural y de recepción del cemento, EHE-08 y RC -16 respectivamente. Sin embargo, el constituyente principal del cemento Portland, el clínker, tiene un nivel de especificación muy reducido.

La norma UNE-EN 197-1, que regula la composición de los cementos comunes, tan sólo especifica que el clínker debe estar constituido por silicatos de calcio ( $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ ) en un contenido superior a dos tercios. El resto del clínker se compone de fases que contienen hierro, aluminio, y otros compuestos. En cuanto al óxido de magnesio, éste no debe exceder del 5,0% en masa. Finalmente, la relación  $\text{CaO}/\text{SiO}$  no deberá ser inferior a 2,0. Por tanto, el fabricante tiene una gran libertad en el control del proceso de producción del clínker del cemento Portland.

Así mismo, la adición de componentes correctores solo es posible en una escala limitada por restricciones técnicas, a menos que se esté fabricando un cemento especial. Generalmente se añade una cantidad que oscila entre el 1 y el 2%, pudiendo llegar al 5% según la norma UNE-EN 197-1.

---

<sup>194</sup> Giovanni A. Juzga León, Reinaldo Villalba Rodríguez, Ronald Rueda Sarmiento. *Sustitución de la arena en procesos de chorreado en seco para la limpieza de superficies metálicas. Colombia. 2009.*

El estudio *Aplicación del silicato de hierro obtenido en el proceso industrial de la fundición de cobre*<sup>195</sup> en el que se basa la información facilitada por Atlantic Copper, concluye que la utilización de silicato de hierro (escoria de cobre) como corrector de hierro en el clínker no afecta de forma significativa a la composición del clínker del cemento Portland. Tal y como se observa en la siguiente tabla, los valores de los óxidos principales detectados en dos muestras de clínker (uno con silicato de hierro y otro con otros correctores), se verifica que se encuentran dentro del mismo orden de magnitud:

**Tabla 7.4.2.1.-1. Composición de dos muestras de clínker de cemento (%).**

| Elemento                       | Clínker con otros correctores | Clínker con silicato de hierro |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 4,42                          | 4,78                           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 2,66                          | 3,09                           |
| CaO                            | 65,27                         | 65,63                          |
| MgO                            | 1,53                          | 1,53                           |
| SO <sub>3</sub>                | 1,17                          | 1,76                           |
| K <sub>2</sub> O               | 0,98                          | 0,93                           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,16                          | 0,09                           |

En cuanto a los compuestos minoritarios, el estudio indica que su contenido en el clínker fabricado con silicato de hierro (escoria de cobre) es inferior que el correspondiente al clínker fabricado con otros correctores de hierro tales como la limonita o la pirita, debido a que la escoria de cobre no presenta las impurezas habituales de los minerales naturales.

Por otra parte, según indicaciones de Atlantic Copper, el sector cementero español demanda un contenido mínimo de hierro en torno al 40%, 50% o 55% expresado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, un contenido máximo de azufre de 4% de SO<sub>3</sub> y contenido máximo de humedad del 2%, 5% o 14% expresado como H<sub>2</sub>O en función del tipo de cemento. Los valores medios de estos tres parámetros en la escoria de cobre se sitúan en 60,3%, 1,5% y 0,7% según las analíticas consultadas, por lo que cumpliría con estos requisitos.

Consecuentemente, distintas publicaciones técnicas<sup>196,197,198,199</sup> consideran que, de acuerdo con las características químicas y mineralógicas de la escoria de cobre, éstas pueden ser utilizadas en la fabricación de cemento como sustituto parcial de otros minerales naturales, disminuyendo los costes de producción y el consumo calorífico, mejorando la ignición de las mezclas crudas en la fabricación del clínker y aumentando

<sup>195</sup> M. A. Sanjuán, J.A. Suárez y P.Mora. *Aplicación del silicato de hierro obtenido en el proceso industrial de la fundición de cobre. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Atlantic Copper, S.L.U., ETSI Minas y Energía UPM. 2018.*

<sup>196</sup> Bipra Gorai, R.K. Jana, *Premchand Characteristics and Utilization of Copper Slag. National Metallurgical Laboratory. 2002.*

<sup>197</sup> M. Najimi, J. Sobhani, A.R. Pourkhorshidi. *Durability of Cooper Slag Contained Concrete Exposed to Sulfate Attack. Building and Housing Research Center. 2010.*

<sup>198</sup> L.E. García Medina, E. Orrantia Borunda, A. Aguilar Elguézaba. *Uso de la Escoria de Cobre en el Proceso de Fabricación de Clínker para Cemento Portland. 2006.*

<sup>199</sup> Romy S. Edwin, Mieke de Shepper, Elke Gruyaert, Nele De Belie. *Effect of copper slag as supplementary cementitious material (SCM) in ultra high performance mortar. Faculty of Engineering, Halu Oleo University, Kendari, Indonesia. 2015.*



la resistencia a la compresión y la tracción así como la durabilidad en los cementos y hormigones en los que pretende formar parte.

Según estos documentos, la actividad puzolánica de la escoria de cobre a corto plazo es insignificante durante los primeros tres meses, debido a que la escoria presenta una menor velocidad de reacción en el mecanismo de fijación de cal. Sin embargo, la actividad puzolánica a largo plazo es semejante al de otros materiales.

Por tanto, la escoria de cobre es un sustitutivo común y ampliamente utilizado en la industria cementera, tal y como corroboran distintos documentos y la *Guía Tecnológica. Directiva 96/61 relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Epígrafe 2.5. Metalurgia del cobre del Ministerio de Industria y Energía*, que señala la fabricación de cemento como uno de los posibles usos de la escoria de cobre procedente de horno de arco eléctrico.

### Material abrasivo

En relación con esta aplicación, el estudio anteriormente citado, indica que el silicato de hierro (escoria de cobre) podría reemplazar a los abrasivos no metálicos que se utilizan para la preparación de superficies metálicas mediante la técnica de chorreado, concretamente en el tratamiento superficial para la aplicación de pinturas en tanques estructurales de carga y de lastre y en otras estructuras de buques, y para la aplicación de pinturas en otras estructuras metálicas.

Según la documentación facilitada, la capacidad abrasiva del silicato de hierro (escoria de cobre) es conforme con los requisitos exigidos en la norma UNE-EN ISO 11126-3:2019<sup>200</sup>. Los requisitos de esta norma se aplican exclusivamente a los materiales abrasivos en lo que se denomina “condición de suministro”, es decir, que son de nueva utilización.

A continuación, se muestran los análisis realizados al silicato de hierro conforme con las especificaciones y métodos de ensayo citados en la norma anterior para su uso como material abrasivo.

**Tabla 7.4.2.1.-2. Análisis silicato de hierro (escoria de cobre).**

| Propiedad                         | Solicitud de subproducto    | UNE-EN ISO 11126-3         | Unidades           | Método de ensayo |
|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|------------------|
| Densidad aparente                 | 1,6 – 1,9 x 10 <sup>3</sup> | 3,3- 3,9 x 10 <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup>  | ISO 11127-3      |
| Dureza Mohs <sup>1)</sup>         | 6,6 – 7,5                   | Mín. 6                     | -                  | ISO 11127-4      |
| Dureza Vickers                    | >660                        | -                          | Kg/mm <sup>2</sup> | ISO 11127-4      |
| Humedad                           | <0,2                        | Máx. 0,2                   | % (m/m)            | ISO 11127-5      |
| Conductividad del extracto acuoso | <25                         | Máx. 25                    | mS/cm              | ISO 11127-6      |
| Conductividad del extracto acuoso | <150                        | -                          | μS/cm              | ASTM D-4940      |
| Cloruros solubles en agua         | <10                         | Máx. 25                    | ppm                | ISO 11127-7      |

<sup>200</sup> UNE-EN ISO 11126-3:2019. *Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 3: Escoria del refinado de cobre. (ISO 11126-3:2018).*

| Propiedad | Solicitud de subproducto | UNE-EN ISO 11126-3 | Unidades | Método de ensayo |
|-----------|--------------------------|--------------------|----------|------------------|
|-----------|--------------------------|--------------------|----------|------------------|

<sup>1)</sup> Puede ser usado otro método para determinar la dureza, con unos requisitos mínimos apropiados, por acuerdo entre las partes interesadas.

Como puede apreciarse en la tabla anterior, la escoria de cobre cumpliría las especificaciones de la UNE-EN ISO 11126-3 salvo para el parámetro de densidad aparente, valor que se encuentra por debajo de lo especificado en la norma de referencia. No obstante, se han identificado diferentes fichas técnicas y de seguridad<sup>201,202</sup>, así como estudios<sup>203</sup> de la escoria de cobre para su uso como abrasivo cuyos valores de densidad aparente cumplen lo exigido por la norma para este parámetro.

En relación con la densidad de la partícula, el documento *Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos*<sup>204</sup> indica que, a mayor densidad de partículas en solución, más fácilmente producen erosión o deformación con sus impactos. También señala que debido a que la energía del impacto depende de la masa de las partículas, a igual velocidad y densidad, partículas de mayor tamaño producen un mayor daño. Otro factor importante es la forma de la partícula, es decir, la mayor o menor angularidad tiene una gran importancia en el desgaste.

En cuanto al uso concreto de la escoria de cobre como material abrasivo, de manera general, la escoria es más abrasiva y produce un desgaste mayor de la línea de transporte de abrasivos, mangueras, acoples y boquilla. Produce también más polución, requiriendo sistemas de extracción y filtrado de polvo de mayor capacidad, así como la necesidad de un sistema de recolección y disposición final<sup>205</sup>.

En cuanto a la granulometría, según la información facilitada por Atlantic Copper la escoria de cobre se somete a una operación de cribado para obtener el tamaño óptimo de uso fijado por el cliente que comprende un intervalo de 0,4 a 2,8 mm, granulometría determinada bajo la norma UNE-EN ISO 11127-2:2012<sup>206</sup>.

<sup>201</sup> <https://piedraiberica.com/wp-content/uploads/2015/03/07004.pdf>

<sup>202</sup> <http://www.aresla.com/wp-content/uploads/2016/05/FICHA-SEGURIDAD-SILICATO-HIERRO.pdf>

<sup>203</sup> Aitana Díaz Suárez. *Economía Circular de los Residuos Siderúrgicos: Sustitución de Abrasivos Tradicionales. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Oviedo. 2017.*

<sup>204</sup> A. J. Vázquez Vaamonde, J. J. de Damborenea González. *Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, 2000.*

<sup>205</sup> CYM Materiales S.A. *Estudio comparativo de costo-rendimiento entre granalla de acero y escoria. Sin fecha.*

<sup>206</sup> UNE-EN ISO 11127-2:2012. *Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Métodos de ensayo para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 2: Análisis granulométrico (ISO 11127-2:2011)*

Distintos estudios identificados<sup>207,208</sup> señalan la idoneidad del silicato de hierro (escoria de cobre) como sustitutivo a la arena de sílice en el mercado mundial para aplicaciones de chorreado en seco.

El Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST)<sup>209</sup> reconoce las escorias de cobre como material abrasivo utilizado en el chorreado distinto a la arena de sílice, además de la granalla con arena, determinados silicatos de aluminio, etc., que suelen contener sílice cristalina en porcentajes variables.

Por tanto, la escoria de cobre es un sustitutivo común y ampliamente utilizado en la industria de los materiales abrasivos, tal y como corroboran distintos documentos como la *Guía Tecnológica. Directiva 96/61 relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Epígrafe 2.5. Metalurgia del cobre del Ministerio de Industria y Energía*, que señala el uso como abrasivo para limpieza de superficies como una de las posibles aplicaciones de la escoria de cobre procedente de horno de arco eléctrico.

### **Conclusiones. Viabilidad técnica de la escoria de cobre.**

En cuanto al uso como árido en aplicaciones no ligadas, según la documentación consultada, la escoria de cobre puede utilizarse en el proceso de elaboración de áridos, en sustitución de materiales de origen natural, para su uso en relleno de zanjas para instalación de tuberías.

La viabilidad técnica de la escoria de cobre como árido alternativo en relleno de zanjas, ha sido justificada a través de estudios técnicos que garantizan el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa de aplicación. Cabe señalar que la escoria de cobre posee marcado CE conforme con la norma de especificaciones armonizada *UNE-EN 13242:2003 "Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes"*. No obstante, cabe destacar que la utilización de la escoria de cobre como relleno no es uno de los usos prioritarios o considerados en Flandes, prevaleciendo sus aplicaciones en usos ligados tipo hormigón o cemento.

En cuanto a su utilización en preparación de superficies por chorreado, la escoria de cobre es un sustitutivo común y ampliamente utilizado en la industria de los materiales abrasivos, según la bibliografía consultada, y que cumple con los requisitos exigidos en la norma *UNE-EN ISO 11126-3:2019 "Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 3: Escoria del refinado de cobre"*. No obstante, debe tenerse en cuenta el valor de densidad aparente de la escoria de cobre que, en ocasiones, puede ser inferior a lo especificado en la norma.

---

<sup>207</sup> Aitana Díaz Suárez. *Economía Circular de los Residuos Siderúrgicos: Sustitución de Abrasivos Tradicionales. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Oviedo. 2017.*

<sup>208</sup> Giovanni A. Juzga León, Reinaldo Villalba Rodríguez, Ronald Rueda Sarmiento. *Sustitución de la arena en procesos de chorreado en seco para la limpieza de superficies metálicas. Colombia. 2009.*

<sup>209</sup> Situaciones de exposición a agentes químicos.  
[https://www.insst.es/documents/94886/791398/BASEQUIM\\_006\\_0.pdf/e1e575d0-b37b-4a15-8d5f-c1c785a4f055?t=1606302587442](https://www.insst.es/documents/94886/791398/BASEQUIM_006_0.pdf/e1e575d0-b37b-4a15-8d5f-c1c785a4f055?t=1606302587442)

Para el uso de la escoria de cobre como corrector de hierro en la fabricación de clínker de cemento, los estudios confirman la viabilidad técnica de esta aplicación, cumpliendo con los requisitos técnicos demandados por el sector cementero en cuanto a contenidos de hierro, azufre y humedad. No obstante, la adición de componentes correctores solo es posible en una cierta cantidad que oscila entre el 1 y el 2%, pudiendo llegar al 5% según la norma UNE-EN 197-1.

En la siguiente tabla se resume la información disponible para cada una de las posibles aplicaciones de las escorias de cobre tratadas, señalando aquellas aplicaciones justificadas por estudios técnicos, los posibles usos finales de cada aplicación y las posibles limitaciones de viabilidad:

**Tabla 7.4.1-1. Resumen uso como árido en aplicaciones no ligadas de la escoria de cobre**

| Aplicación y normativa de referencia  | Estudio técnico | Escenario de aplicación              | Destinos   | Aplicabilidad y limitaciones de uso  |
|---|-----------------|--------------------------------------|--|--|
| Relleno localizado, concretamente relleno de zanja de tubería<br>PG-3 Art.332 | Sí              | Con cobertura totalmente impermeable | Construcción de firmes de carreteras: relleno de zanjas para instalación de tuberías | Se debe tener en cuenta el tamaño granulométrico de la escoria de cobre, ya que los materiales de relleno que se utilicen para el apoyo no deben tener partículas de tamaño superior a 40 mm para diámetros de tubería entre 200 y 600 mm. |

**Tabla 7.4.1-2. Resumen otros usos de la escoria de cobre**

| Aplicación y normativa de referencia  | Estudio técnico | Destinos   | Aplicabilidad y limitaciones de uso  |
|---|-----------------|--|--|
| Como materia prima en la fabricación de materiales de la construcción: fabricación de clínker | Sí              | Como corrector de hierro en la fabricación de clínker de cemento Portland      | La adición de componentes correctores solo es posible en una escala limitada que oscila entre el 1 y el 2%, pudiendo llegar al 5%.<br>El sector cementero español demanda un contenido mínimo de hierro en torno al 40%, 50% o 55% expresado como Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , un contenido máximo de azufre de 4% de SO <sub>3</sub> y contenido máximo de humedad del 2%, 5% o 14% expresado como H <sub>2</sub> O en función del tipo de cemento. |
| Material abrasivo   | Sí              | Para la preparación de superficies metálicas mediante la técnica de chorreado. | Se debe tener en cuenta el tamaño granulométrico para obtener el tamaño óptimo de uso fijado por el cliente que comprende un intervalo de 0,4 a 2,8 mm.  |

## 7.5 CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y SOBRE LA SALUD HUMANA

La escoria de cobre se encuentra registrada bajo el *Reglamento (CE) nº 1907/2006 (REACH)*. Sus códigos de identificación son los siguientes:

**Tabla 7.5-1. Códigos de identificación de las escorias de cobre.**

| Nombre           | NºCAS      | NºEC      | Nº REGISTRO REACH     |
|------------------|------------|-----------|-----------------------|
| Escoria de cobre | 67711-92-6 | 266-968-3 | 01-2119513228-45-0003 |

Según apunta Atlantic Copper, además de cumplir con los requisitos del proceso de registro conforme al *Reglamento REACH*, no cumple con los criterios para ser clasificado como peligroso conforme al *Reglamento (CE) nº 1272/2008 sobre la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP)* en función de los numerosos ensayos realizados

Cabe señalar que el Convenio de Basilea<sup>210</sup>, que tiene por objetivo establecer un control estricto de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y otros desechos para proteger la salud de las personas y el medio ambiente de los efectos nocivos que pudieran derivarse de la generación y la manipulación de éstos, incluye en su Lista B " *Desechos que no estarán sujetos a lo dispuesto en el apartado a) del párrafo 1 del artículo 1 del Convenio de Basilea<sup>211</sup>, a menos que contengan materiales incluidos en el anexo I en una cantidad tal que les confiera una de las características del anexo III*", en su entrada B1100 a las "escorias de la elaboración del cobre destinado a una elaboración o refinación posteriores, que no contengan arsénico, plomo o cadmio en cantidad tal que les confiera las características peligrosas del anexo III" y, en su entrada B2040 a las "escorias de la producción de cobre, químicamente estabilizadas, con un elevado contenido de hierro (más de 20%) y elaboradas de conformidad con especificaciones industriales (por ejemplo DIN 4301 y DIN 8201) principalmente con fines de construcción y de abrasión".

Por otra parte, aquellas industrias que tienen asociadas actividades laborales que implican el almacenamiento, la manipulación de materiales o la generación de residuos (denominados materiales NORM)<sup>212</sup> que habitualmente no se consideran radiactivos, pero que contienen radionucleidos naturales que podrían provocar un incremento significativo de la exposición de los trabajadores y, en su caso, de los miembros del público, se denominan industrias NORM, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 62.1.b)

<sup>210</sup> *Convenio de Basilea. Sistema de control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y otros desechos. Manual de Instrucciones. UNEP. Malasia 1998.*

<sup>211</sup> Art.1. Serán "desechos peligrosos" a los efectos del presente Convenio los siguientes desechos que sean objeto de movimientos transfronterizos: a) Los desechos que pertenezcan a cualquiera de las categorías enumeradas en el Anexo I (Categorías de desechos que hay que controlar), a menos que no tengan ninguna de las características descritas en el Anexo III; y

<sup>212</sup> *Se denominan Materiales Radiactivos de Origen Natural (en inglés NORM: "Naturally Occurring Radioactive Materials") a aquellos materiales que emiten radiaciones de forma natural. Estos materiales contienen niveles significativos de radionucleidos naturales que durante la industrialización son extraídos y procesados, haciéndose imprescindible establecer unos controles de su influencia y actividad, ya que el procesamiento posterior de dichos materiales puede incluso hacer aumentar la concentración radiactiva que tenían inicialmente. De este modo, es posible que los productos derivados y los productos finales del proceso industrial lleguen a aumentar los niveles de exposición a la que se ven sometida tanto los trabajadores como los usuarios.*

del *Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes*, aprobado por *Real Decreto 783/2001, de 6 de julio*, y modificado por *Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre*.

El listado de estas actividades laborales se recoge en el Anexo de la *Instrucción del Consejo de Seguridad Nuclear IS-33*<sup>213</sup>, de 21 de diciembre de 2011, así como en el Anexo VI de la *Directiva 2013/59/Euratom*, de 5 de diciembre de 2013<sup>214</sup>. En dichos listados se cita específicamente la fundición de cobre.

La *Orden IET/1946/2013, por la que se regula la gestión de los residuos generados en las actividades que utilizan materiales que contienen radionucleidos naturales*, recoge los valores de las concentraciones de actividad (niveles de exención/desclasificación) que, en caso de no superarse, permiten abordar directamente la gestión convencional de los residuos procedentes de estas actividades sin ninguna restricción de tipo radiológico. En caso de superarse, se deberá realizar el estudio de impacto radiológico asociado a su gestión requerido por el *Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes*.

Si, una vez realizado dicho estudio, la estimación de dosis efectiva anual asociada a la gestión de los residuos para los miembros del público y para los trabajadores es inferior a los valores límite establecidos, se podrá realizar la gestión convencional, siempre que se apliquen los criterios y las medidas de control radiológico que se establecen en la Instrucción del Consejo de Seguridad Nuclear IS-33, citada anteriormente. En caso contrario, la gestión deberá llevarla a cabo la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. (ENRESA).

Según los estudios disponibles, puede considerarse que el impacto radiológico ocupacional asociado al desarrollo de las actividades laborales en Atlantic Copper es muy limitado (por debajo de los umbrales legales). Así mismo, el impacto radiológico que podría generar la actividad sobre la población es despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica, e indiscernible del fondo ambiental.

Por tanto, esta instalación no está sometida a control regulador (en términos radiológicos) no siendo necesario que adopte medidas correctoras destinadas a reducir la exposición a radiaciones ionizantes de trabajadores y/o público, ni tampoco la aplicación de medidas de protección radiológica de sus trabajadores y/o público.

#### **7.5.1 Uso como árido. Aplicaciones no ligadas de la escoria de cobre**

Debido a sus características físicas y químicas, y al tratarse de un residuo sólido, para el posible uso como árido en rellenos, la lixiviación es el principal sistema potencial de emisión contaminante de la escoria de cobre, es decir, la emisión de los componentes que forman la escoria hacia los suelos, las aguas superficiales y las aguas subterráneas.

---

<sup>213</sup> Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). *Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural*.

<sup>214</sup> *Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom*.

Según lo expresado por Atlantic Copper, como consecuencia de las características microestructurales de la escoria de cobre, ésta presenta una reducida solubilidad en el agua de los metales traza presentes en la matriz, firmemente interconectados entre sí en las estructuras de vidrio del silicato y otras fases minerales, por lo que su liberación se encuentra limitada, afirmación en línea con lo expuesto en el *Documento BREF de la Industria de Procesos de Metales No Ferreos*<sup>215</sup> que señala que muchas de las escorias producidas por los procesos de tratamiento de escorias de cobre contienen niveles muy bajos de metales lixiviables y son estables.

○ **Resultados analíticos sobre el lixiviado.**

A continuación, se presentan los resultados analíticos facilitados en las solicitudes de subproducto, correspondientes a los trabajos desarrollados por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) de abril de 2021, consistentes en la realización de los siguientes ensayos:

- Ensayos previos:
  - UNE-EN 933-1. Análisis granulométrico por tamizado en seco.
  - UNE-ISO 11465. Calidad del suelo. Determinación de la materia seca y del contenido en agua en términos de masa. Método gravimétrico.
- Ensayo de lixiviación:
  - UNE-EN 14405. Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento en la lixiviación. Ensayo de percolación de flujo ascendente. **Ensayo de columna.**
  - UNE-EN 12457-2. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 2. Ensayo por lotes de una etapa para una relación líquido-sólido de 10 L/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4mm (con o sin reducción de tamaño). **Ensayo de volteo.**
- Ensayos para la determinación de la composición química de los lixiviados:
  - UNE-EN ISO 11885. Calidad del agua. Determinación de elementos seleccionados por espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Metales por ICP.
  - UNE-EN ISO 17852. Calidad del agua. Determinación de mercurio. Método por espectrometría de fluorescencia atómica. Mercurio por FA.
  - UNE-EN ISO 10304-1. Calidad del agua. Determinación de aniones disueltos por cromatografía de iones en fase líquida. Parte 1: Determinación de bromuro, cloruro, fluoruro, nitrato, nitrito, fosfato y sulfato. Sales por Cl.

El ensayo de columna consiste en una prueba de percolación de flujo ascendente para determinar el comportamiento en la lixiviación de sustancias inorgánicas y orgánicas no volátiles de materiales granulares

---

<sup>215</sup> *Documento BREF. Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales No Ferreos. 2005.*

en condiciones de percolación normalizadas (UNE-EN 14405). La muestra se compacta en una columna a través de la cual se hace pasar un lixiviante (agua desionizada clase 2), en flujo ascendente vertical continuo, de manera que la columna está siempre saturada de agua. El ensayo se realiza, según indica la norma, bajo condiciones controladas: diámetro de la columna, caudal de agua y relación líquido-sólido (L/S). Las 7 fracciones de lixiviado a recoger según su relación L/S acumulada son: 0,1 –0,2 –0,5 –1,0 –2,0 –5,0 y 10,0 L/kg de materia seca. Únicamente se presentan los resultados obtenidos para el primer eluato, con una relación L/S 0,1 L/kg, dado que es la fracción para la cual se dispone de valores límite de admisión de residuos en vertederos.

Cabe señalar la repetición del ensayo de lixiviación en columna con objeto de comprobar los resultados obtenidos para los metales (excepto mercurio) en el primer ensayo.

El ensayo de lixiviación por volteo consiste en una prueba de conformidad que proporciona información sobre la lixiviación de residuos granulares bajo condiciones específicas. Dadas las características granulométricas del material, se ha realizado el ensayo de acuerdo con lo especificado en la norma UNE-EN 12457-2, es decir, para una relación líquido-sólido de 10 L/kg de materia seca y un tamaño de partícula inferior a 4 mm.

Los resultados obtenidos en ambos ensayos fueron comparados con los valores límite fijados en la *Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre*<sup>216</sup>, para residuos inertes, no peligrosos y peligrosos, como se observa en las siguientes tablas.

**Tabla 7.5.1.1-1. Resultados de lixiviación. UNE-EN12457-2 (L/S=10). Ensayo de volteo. CEDEX.**

| Nº Muestra         | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Media    | Valores límite (Inertes) | Valores límite (No peligrosos) | Valores límite (Peligrosos) |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Componente         | mg/kg     | mg/kg     | mg/kg     | mg/kg    | mg/kg                    | mg/kg                          | mg/kg                       |
| Vol. Lixiviado (l) | 0,8491    | 0,8538    | 0,8529    | 0,8534   |                          |                                |                             |
| Masa seca (kg)     | 0,08537   | 0,08585   | 0,8575    | 0,08580  |                          |                                |                             |
| Arsénico (As)      | 0,0577    | 0,0646    | <0,0083   | 0,0435   | 0,5                      | 2                              | 25                          |
| Bario (Ba)         | 0,0378    | 0,0348    | 0,0308    | 0,0345   | 20                       | 100                            | 300                         |
| Cadmio (Cd)        | <0,0001   | <0,0001   | <0,0001   | <0,0001  | 0,04                     | 1                              | 5                           |
| Cromo (Cr)         | 0,0020    | <0,0009   | <0,0009   | 0,0013   | 0,5                      | 10                             | 70                          |
| Cobre (Cu)         | 0,2964    | 0,2447    | 0,2994    | 0,2801   | 2                        | 50                             | 100                         |
| Mercurio (Hg)*     | <0,00001  | <0,00001  | <0,00001  | <0,00001 | 0,01                     | 0,2                            | 2                           |
| Molibdeno (Mo)     | 0,1481    | 0,2386    | 0,2167    | 0,2011   | 0,5                      | 10                             | 30                          |
| Níquel (Ni)        | <0,0007   | <0,0007   | <0,0007   | <0,0007  | 0,4                      | 10                             | 40                          |
| Plomo (Pb)         | 0,1289    | 0,0503    | 0,1487    | 0,1093   | 0,5                      | 10                             | 50                          |
| Antimonio (Sb)     | 0,0161    | 0,0181    | <0,0022   | 0,0171   | 0,06                     | 0,7                            | 5                           |
| Selenio (Se)       | 0,0041    | 0,0041    | 0,0250    | 0,0110   | 0,1                      | 0,5                            | 7                           |
| Zinc (Zn)          | 0,4516    | 0,3083    | 0,3929    | 0,3842   | 4                        | 50                             | 200                         |
| Cloruro            | 7,7210    | 7,4319    | 7,9500    | 7,7010   | 800                      | 15.000                         | 25.000                      |
| Fluoruro           | 0,0179    | 0,0179    | 0,0179    | 0,0179   | 10                       | 150                            | 500                         |
| Sulfato            | 26,7867   | 15,6456   | 28,7766   | 23,7363  | 1.000                    | 20.000                         | 50.000                      |

<sup>216</sup> *Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimiento de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.*



| Nº Muestra         | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Media   | Valores límite (Inertes) | Valores límite (No peligrosos) | Valores límite (Peligrosos) |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|---------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Vol. Lixiviado (l) | 0,8491    | 0,8538    | 0,8529    | 0,8534  |                          |                                |                             |
| Masa seca (kg)     | 0,08537   | 0,08585   | 0,8575    | 0,08580 |                          |                                |                             |

\*El contenido de Hg se ha determinado por fluorescencia atómica

Tabla 7.5.1.1-2. Resultados de lixiviación. UNE-EN14405 (L/S=0,1). Ensayo de columna (1). CEDEX.

| Nº Muestra         | Muestra 1     | Muestra 2     | Muestra 3     | Media         | Valores límite (Inertes) | Valores límite (No peligrosos) | Valores límite (Peligrosos) |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Vol. Lixiviado (l) | 0,509         | 0,527         | 0,508         | 0,515         |                          |                                |                             |
| Masa seca (kg)     | 5,0908        | 5,2688        | 5,0798        | 5,1465        |                          |                                |                             |
| Componente         | mg/L          | mg/L          | mg/L          | mg/L          | mg/L                     | mg/L                           | mg/L                        |
| Arsénico (As)      | <0,0083       | <0,0083       | 0,0115        | 0,0094        | 0,06                     | 0,3                            | 3                           |
| Bario (Ba)         | 0,0517        | 0,0503        | 0,0430        | 0,0483        | 4                        | 20                             | 60                          |
| Cadmio (Cd)        | 0,0016        | 0,0010        | 0,0012        | 0,0013        | 0,02                     | 0,3                            | 1,7                         |
| Cromo (Cr)         | <0,0009       | <0,0009       | <0,0009       | <0,0009       | 0,1                      | 2,5                            | 15                          |
| Cobre (Cu)         | <b>0,7215</b> | 0,3580        | 0,4594        | 0,5130        | 0,6                      | 30                             | 60                          |
| Mercurio (Hg)*     | <0,00001      | <0,00001      | <0,00001      | <0,00001      | 0,002                    | 0,03                           | 0,3                         |
| Molibdeno (Mo)     | 0,1480        | <b>0,2558</b> | 0,1792        | 0,1943        | 0,2                      | 3,5                            | 10                          |
| Níquel (Ni)        | 0,0346        | 0,0293        | 0,0301        | 0,0313        | 0,12                     | 3                              | 12                          |
| Plomo (Pb)         | 0,0349        | 0,0295        | 0,0266        | 0,0303        | 0,15                     | 3                              | 15                          |
| Antimonio (Sb)     | <b>0,2122</b> | <b>0,3357</b> | <b>0,2728</b> | <b>0,2736</b> | 0,1                      | 0,15                           | 1                           |
| Selenio (Se)       | 0,0057        | 0,0047        | 0,0046        | 0,0050        | 0,04                     | 0,2                            | 3                           |
| Zinc (Zn)          | 0,3741        | 0,2989        | 0,3231        | 0,3320        | 1,2                      | 15                             | 60                          |
| Cloruro            | 16,700        | 11,800        | 9,460         | 12,653        | 460                      | 8.500                          | 15.000                      |
| Fluoruro           | <0,002        | <0,002        | <0,002        | <0,002        | 2,5                      | 40                             | 120                         |
| Sulfato            | 38,700        | 39,500        | 34,500        | 37,567        | 1.500                    | 7.000                          | 17.000                      |

\*El contenido de Hg se ha determinado por fluorescencia atómica

Tabla 7.5.1.1-3. Resultados de lixiviación. UNE-EN14405 (L/S=0,1). Ensayo de columna (2). CEDEX.

| Nº Muestra         | Muestra 1     | Muestra 2     | Muestra 3     | Media         | Valores límite (Inertes) | Valores límite (No peligrosos) | Valores límite (Peligrosos) |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Vol. Lixiviado (l) | 0,547         | 0,564         | 0,515         | 0,542         |                          |                                |                             |
| Masa seca (kg)     | 5,4716        | 5,6386        | 5,1516        | 5,4206        |                          |                                |                             |
| Componente         | mg/L          | mg/L          | mg/L          | mg/L          | mg/L                     | mg/L                           | mg/L                        |
| Arsénico (As)      | 0,0177        | 0,0238        | 0,0148        | 0,0148        | 0,06                     | 0,3                            | 3                           |
| Bario (Ba)         | 0,0514        | 0,0640        | 0,1266        | 0,0807        | 4                        | 20                             | 60                          |
| Cadmio (Cd)        | 0,0010        | <0,0001       | <0,0001       | 0,0010        | 0,02                     | 0,3                            | 1,7                         |
| Cromo (Cr)         | <0,0009       | <0,0009       | <0,0009       | <0,0009       | 0,1                      | 2,5                            | 15                          |
| Cobre (Cu)         | <b>0,8431</b> | 0,0300        | 0,1548        | 0,3426        | 0,6                      | 30                             | 60                          |
| Molibdeno (Mo)     | <b>4,9815</b> | <b>4,5117</b> | <b>2,9151</b> | <b>4,1361</b> | 0,2                      | 3,5                            | 10                          |
| Níquel (Ni)        | 0,0181        | 0,0015        | 0,0047        | 0,0081        | 0,12                     | 3                              | 12                          |
| Plomo (Pb)         | 0,0174        | 0,0159        | <0,0101       | 0,0167        | 0,15                     | 3                              | 15                          |
| Antimonio (Sb)     | <b>0,1065</b> | <b>0,1510</b> | <b>0,0824</b> | <b>0,1133</b> | 0,1                      | 0,15                           | 1                           |
| Selenio (Se)       | <0,0027       | <0,0027       | <0,0027       | <0,0027       | 0,04                     | 0,2                            | 3                           |
| Zinc (Zn)          | 0,7616        | 0,0899        | 0,2108        | 0,3541        | 1,2                      | 15                             | 60                          |

Entre las conclusiones de los ensayos llevados a cabo se destaca lo siguiente:

- El análisis granulométrico obtenido refleja que la muestra tiene un tamaño de partículas muy uniforme, ya que el 100% es inferior a 4 mm, e incluso el 85% de la muestra está comprendida entre

- 0,5 y 2 mm. Esto evita, por un lado, tener que triturar alguna fracción de la muestra y, por otro, la necesidad de aplicar un método específico para la reducción de la muestra de laboratorio.
- Los valores de pH, tanto en el ensayo de columna como en el de volteo, son bastante constantes y neutros (siempre entre 6 y 7 aproximadamente). Esto, por una parte, favorece la estabilidad de los lixiviados, ya que evita la precipitación o carbonatación que se podría producir si el pH fuera superior a 9 y, por otra, refleja una independencia del pH respecto de la relación L/S: entre 0,1 y 10 L/kg de materia seca.
  - Los valores de conductividad obtenidos en los lixiviados son muy bajos, sobre todo en el ensayo de volteo, y están muy lejos del valor de referencia indicado por las normas de lixiviación (7.500 mS/m), por encima del cual podrían presentarse problemas de precipitación al acidular los lixiviados, requiriendo diluir las muestras. En el caso del ensayo de columna, se observa que la conductividad disminuye a medida que aumenta la relación L/S, lo cual es lógico teniendo en cuenta que la masa de materia seca es constante mientras que el volumen de la fracción recogida va aumentando.
  - Los resultados de caracterización de los lixiviados del ensayo de volteo muestran concentraciones de metales y sales inferiores a los valores límite de admisión en vertederos para residuos inertes.
  - En la caracterización de los lixiviados procedentes del primer ensayo de columna (1), las concentraciones de cobre y molibdeno superan ligeramente los valores límite de admisión en vertederos para residuos inertes, si bien, los valores medios de las tres columnas sí cumplirían con dichos límites. **La concentración de antimonio supera en todos los casos el valor límite de residuos inertes y también el de no peligrosos.** El análisis de metales de los lixiviados del ensayo de columna repetido (2) muestra que **las concentraciones de cobre, molibdeno y antimonio superan los valores límite de admisión en vertederos, para residuos inertes, si bien, el valor medio del Cu sí cumpliría con dichos límites. En el caso del molibdeno, la concentración supera también el valor límite de residuos no peligrosos.**

También se presentan los resultados analíticos correspondientes a los trabajos desarrollados por el laboratorio AGQ Mining & Bioenergy, laboratorio acreditado por ENAC para los ensayos realizados, con fecha diciembre de 2020, consistentes en la realización de los siguientes ensayos sobre la escoria de cobre:

- Ensayo de lixiviación:
  - UNE-EN 14405. Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento en la lixiviación. Ensayo de percolación de flujo ascendente. **Ensayo de columna.**
  - UNE-EN 12457-4. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4. Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 L/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño). **Ensayo de volteo.**

Los resultados obtenidos de ambos ensayos fueron igualmente comparados con los valores límite fijados en la *Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre*<sup>217</sup>, para residuos inertes, no peligrosos y peligrosos, como se observa en las siguientes tablas.

**Tabla 7.5.1.1-4. Resultados de lixiviación (mg/kg). UNE-EN12457-4 (L/S=10). Ensayo de volteo. AGQ.**

| Parámetro      | Resultados | Valores límite (Inertes) | Valores límite (No peligrosos) | Valores límite (Peligrosos) |
|----------------|------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Arsénico (As)  | 0,04       | 0,5                      | 2                              | 25                          |
| Bario (Ba)     | <0,05      | 20                       | 100                            | 300                         |
| Cadmio (Cd)    | <0,005     | 0,04                     | 1                              | 5                           |
| Cromo (Cr)     | <0,05      | 0,5                      | 10                             | 70                          |
| Cobre (Cu)     | 0,24       | 2                        | 50                             | 100                         |
| Mercurio (Hg)  | <0,01      | 0,01                     | 0,2                            | 2                           |
| Molibdeno (Mo) | 0,23       | 0,5                      | 10                             | 30                          |
| Níquel (Ni)    | <0,05      | 0,4                      | 10                             | 40                          |
| Plomo (Pb)     | <0,025     | 0,5                      | 10                             | 50                          |
| Antimonio (Sb) | 0,03       | 0,06                     | 0,7                            | 5                           |
| Selenio (Se)   | <0,05      | 0,1                      | 0,5                            | 7                           |
| Zinc (Zn)      | <0,50      | 4                        | 50                             | 200                         |
| Cloruro        | 5,60       | 800                      | 15.000                         | 25.000                      |
| Fluoruro       | <0,5       | 10                       | 150                            | 500                         |
| Sulfato        | 8,00       | 1.000                    | 20.000                         | 50.000                      |

**Tabla 7.5.1.1-5. Resultados de lixiviación (mg/l). UNE-EN 14405 (L/S=0,1). Ensayo de columna. AGQ.**

| Parámetro      | Resultados   | Valores límite (Inertes) | Valores límite (No peligrosos) | Valores límite (Peligrosos) |
|----------------|--------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Arsénico (As)  | 0,027        | 0,06                     | 0,3                            | 3                           |
| Bario (Ba)     | 0,015        | 4                        | 20                             | 60                          |
| Cadmio (Cd)    | 0,0005       | 0,02                     | 0,3                            | 1,7                         |
| Cromo (Cr)     | <0,005       | 0,1                      | 2,5                            | 15                          |
| Cobre (Cu)     | 0,153        | 0,6                      | 30                             | 60                          |
| Mercurio (Hg)  | <0,001       | 0,002                    | 0,03                           | 0,3                         |
| Molibdeno (Mo) | <b>0,318</b> | 0,2                      | 3,5                            | 10                          |
| Níquel (Ni)    | 0,018        | 0,12                     | 3                              | 12                          |
| Plomo (Pb)     | <0,0025      | 0,15                     | 3                              | 15                          |
| Antimonio (Sb) | 0,023        | 0,1                      | 0,15                           | 1                           |
| Selenio (Se)   | <0,005       | 0,04                     | 0,2                            | 3                           |
| Zinc (Zn)      | <0,050       | 1,2                      | 15                             | 60                          |
| Cloruro        | 7,65         | 460                      | 8.500                          | 15.000                      |
| Fluoruro       | 0,085        | 2,5                      | 40                             | 120                         |
| Sulfato        | 29,38        | 1.500                    | 7.000                          | 17.000                      |

<sup>217</sup> *Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimiento de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.*

Como puede apreciarse, todos los resultados se mantienen por debajo de los límites de referencia, exceptuando **el molibdeno en el ensayo de columna que supera el límite de vertedero para residuos inertes.**

Por otra parte, los resultados obtenidos en los ensayos de columna se han comparado con los valores límite establecidos en el *Reglamento sobre la introducción de una ordenanza de materiales de construcción sustitutivos, sobre la revisión de la ordenanza de protección de suelos y lugares contaminados y sobre la modificación de la ordenanza de vertederos y de la de residuos industriales de Alemania*<sup>218</sup>, estimados también conforme a un ensayo de columna, aunque cabe señalar que no son directamente comparables por no estar basados en la misma relación líquido-sólido.

**Tabla 7.5.1.1-6. Comparación resultados de lixiviación ensayos de columna (mg/l) (L/S=0,1) con valores límite Alemania (L/S 2).**

| Parámetro      | Resultados AGQ | Resultados CEDEX (1) | Resultados CEDEX (2) | Valores límite Alemania |
|----------------|----------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Arsénico (As)  | 0,027          | 0,0094               | 0,0148               | 0,055                   |
| Bario (Ba)     | 0,015          | 0,0483               | 0,0807               |                         |
| Cadmio (Cd)    | 0,0005         | 0,0013               | 0,0010               |                         |
| Cromo (Cr)     | <0,005         | <0,0009              | <0,0009              |                         |
| Cobre (Cu)     | <b>0,153</b>   | <b>0,5130</b>        | <b>0,3426</b>        | 0,055                   |
| Mercurio (Hg)  | <0,001         | <0,00001             | -                    |                         |
| Molibdeno (Mo) | <b>0,318</b>   | <b>0,1943</b>        | <b>4,1361</b>        | 0,11                    |
| Níquel (Ni)    | 0,018          | 0,0313               | 0,0081               |                         |
| Plomo (Pb)     | <0,0025        | 0,0303               | 0,0167               |                         |
| Antimonio (Sb) | 0,023          | <b>0,2736</b>        | <b>0,1133</b>        | 0,025                   |
| Selenio (Se)   | <0,005         | 0,0050               | <0,0027              |                         |
| Zinc (Zn)      | <0,050         | 0,3320               | 0,3541               |                         |
| Cloruro        | 7,65           | 12,653               |                      |                         |
| Fluoruro       | 0,085          | <0,002               |                      |                         |
| Sulfato        | 29,38          | 37,567               |                      |                         |

Como se puede observar en la tabla anterior, las concentraciones detectadas en ambos laboratorios para tres de los cuatro metales pesados regulados en la normativa alemana en las escorias de cobre son superiores a los valores límite, correspondientes al cobre, molibdeno y antimonio.

En esta comparativa, aun siendo meramente orientativa, se obtienen conclusiones similares a las obtenidas tras el análisis de los resultados detectados en los ensayos de columna realizados por el laboratorio del CEDEX, siendo el cobre, antimonio y molibdeno los parámetros que podrían presentar una mayor capacidad de lixiviación.

<sup>218</sup> *Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung* <https://www.bundesrat.de/SharedDocs/beratungsvorgaenge/2017/0501-0600/0566-17>

- **Estudio “Copper metallurgical slags: mineralogy, bio/weathering processes and metal bioleaching”<sup>219</sup>**

El estudio se centra en evaluar la estabilidad ambiental de las escorias de cobre-metalúrgicas resultantes de diferentes períodos de actividades industriales y diferentes tecnologías de fundición. Para ello, se realizaron estudios de caracterización y lixiviación.

Según el estudio, generalmente se distinguen dos tipos de fases en las escorias de cobre: las fases primarias resultantes de la transformación del mineral y las fases secundarias que son consecuencia de la erosión.

Las fases primarias son componentes principales de las escorias e incluyen silicatos y matrices vítreas de sílice. Otras fases primarias como son los óxidos cristalinos, sulfuros, así como metales puros, aleaciones y compuestos intermetálicos también se encuentran comúnmente en las escorias metalúrgicas, pero en cantidades mucho menores en comparación con los silicatos.

También se observan algunas variaciones en la composición de la fase primaria debido a una serie de factores relacionados con el proceso tecnológico: tipo de minerales aplicados, temperatura de fundición, tipo de aditivos, fundentes, material del horno y tasas de enfriamiento.

El enfriamiento lento de la escoria favorece la cristalización parcial con presencia de componentes cristalinos y vítreos, mientras que el enfriamiento rápido conduce a la formación del material con estructuras amorfas.

Los elementos metálicos (por ejemplo, Cu, Pb, Zn, As, etc.) se asocian principalmente con sulfuros de cobre como la bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y la calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) detectados en la escoria. A pesar de que los sulfuros son fases volumétricas menores en las escorias, son portadores de metales primarios, lo que los hace significativos para la evaluación del riesgo ambiental. Algunos minerales aplicados para el proceso pirometalúrgico contienen minerales sulfurosos, por lo tanto, algunos compuestos de escoria reflejan el tipo de minerales que fueron usados para la fundición.

La formación de fases secundarias depende de factores fisicoquímicos, así como de la accesibilidad de otros compuestos (cationes y aniones) que favorecen la formación de fases particulares. La variación de la porosidad y la estructura de la escoria, las condiciones de pH, el potencial redox, los componentes orgánicos, los factores biológicos, la acción de los microorganismos son, entre otros, algunos de los elementos que el estudio considera que pueden alterar la escoria dando lugar a fases secundarias y a la posible liberación de metales.

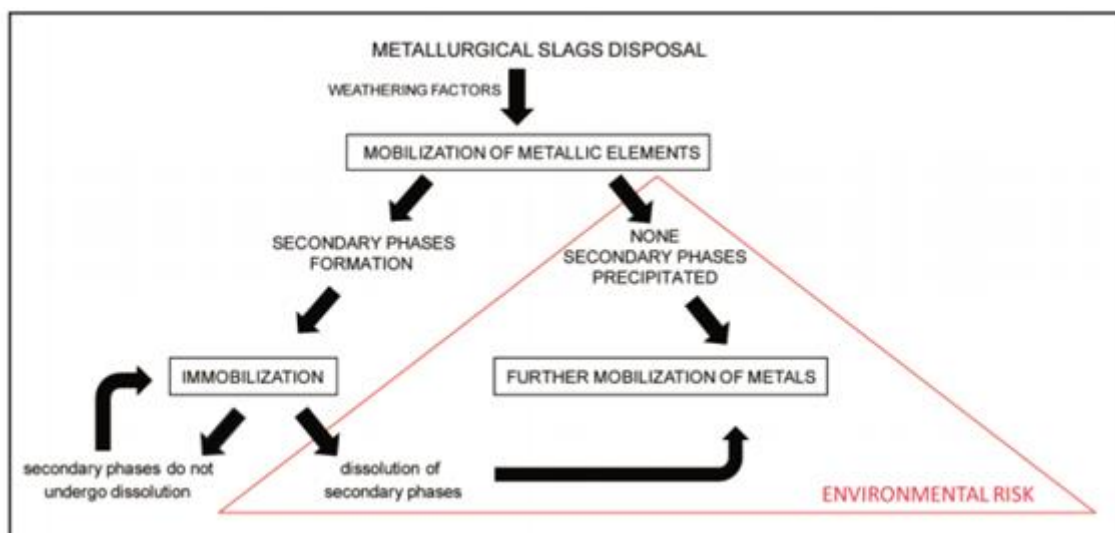
Como se ha comentado, los sulfuros metálicos son los más importantes desde el punto de vista ambiental. Su susceptibilidad a la intemperie es extremadamente alta, lo que significa que pueden ser fácilmente alterados, especialmente en condiciones oxidantes que resultan en la movilización de elementos metálicos. Además, una cuestión importante relacionada con la erosión de los sulfuros es su tendencia para generar

---

<sup>219</sup> Anna Potysz. *Copper Metallurgical slags: Mineralogy, bio/weathering processes and metal bioleaching*. PHD Thesis. Université Paris-Est. UNESCO-IHE. 2012-2015 PHD THESIS (2012-2015).

acidez en el proceso de disolución, que puede atacar a otras fases vítreas metálicas provocando un riesgo ambiental.

Imagen 7.5.1.1-1. Importancia de la formación de fases secundarias



Según el estudio, el impacto ambiental de las escorias está estrechamente relacionado con su potencial para producir lixiviados peligrosos que a menudo contienen altas concentraciones de elementos metálicos.

Aunque las fases metálicas pueden liberar compuestos peligrosos, no tienen por qué suponer un riesgo real para el medio ambiente. Algunas fases pueden ser resistentes a la intemperie y en este caso considerarse como fases minerales de baja influencia ambiental. En contraste, otras fases pueden ser fácilmente erosionadas en una condición dada y deben ser percibidas como ambientalmente significativas. Además, los metales liberados pueden ser atrapados e inmovilizados por la precipitación de las fases secundarias.

Generalmente, en la mayoría de los análisis que siguieron procedimientos estandarizados, el cobre mostró una movilización irrelevante que no excedió del 0,53% (1,8 mg/L) y alcanzó una movilización máxima de 2,8% (150 mg/L). El zinc y el plomo revelaron unos valores de lixiviado que no superan el 0,4%, excepto en condiciones agresivas que alcanzaron un nivel de extracción del 9,55% para el zinc y del 1,9% del plomo. El arsénico mostró una movilidad limitada alcanzando valores no superiores al 1,2%.

Una tendencia común que se desprende de las pruebas de lixiviación es que la concentración máxima de contaminantes lixiviados se produce en condiciones muy ácidas (pH- 2-4), disminuyendo significativamente hacia el pH natural de la escoria y aumentando ligeramente en condiciones muy alcalinas.

Basándose en los resultados de los análisis de lixiviación en función del pH, se puede concluir que las escorias de cobre no son materiales completamente inertes, porque su exposición a diferentes condiciones de pH puede conducir a una liberación significativa de metal. El lixiviado de los metales es especialmente alto en condiciones fuertemente ácidas y mucho más importante que la de los metales altamente alcalinos. Este

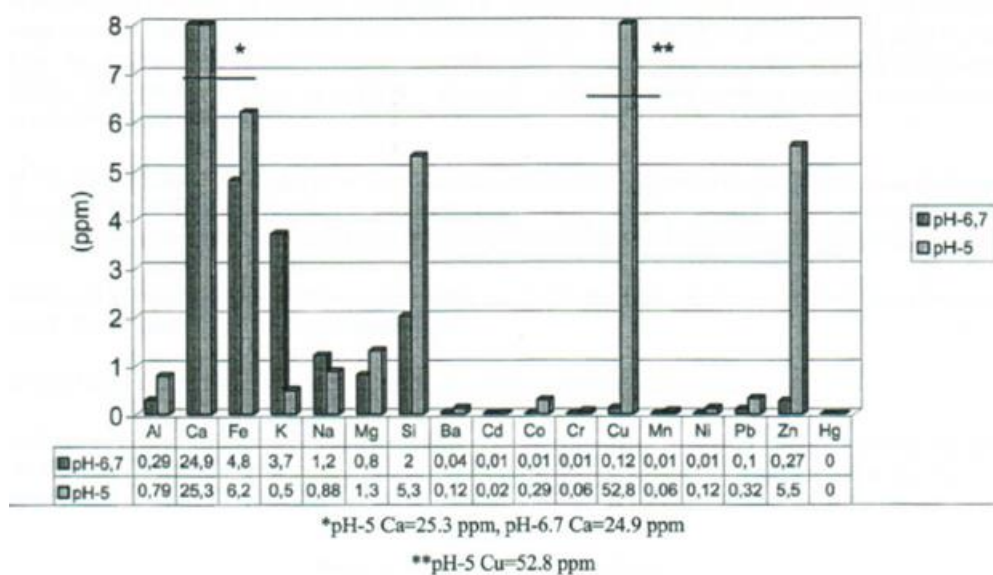
punto es significativo, pero por otro lado tales condiciones agresivas (pH=2) no ocurren normalmente en la naturaleza. No obstante, en los vertederos pueden darse situaciones extremas relacionadas con pH bajos.

Finalmente, según los resultados de lixiviación, la susceptibilidad de las escorias de cobre a ser lixiviadas depende tanto de su química como de su mineralogía, jugando un papel principal el lixiviado de metales de la fase mineral. Por lo tanto, el estudio concluye que es importante considerar por separado e individualmente el comportamiento de las escorias para prevenir la contaminación potencial del medio ambiente.

○ **Otros estudios de lixiviación**

El estudio identificado<sup>220</sup>, centrado en el análisis de la liberación de elementos contaminantes en matrices cementantes con escoria de cobre, incluye también un análisis de lixiviación de la propia escoria según el método descrito en la *Orden Ministerial de 13 de octubre de 1989 por la que se determinan los métodos de caracterización de los residuos tóxicos y peligrosos*, actualmente no vigente y cuyos resultados en función del pH se muestran en la siguiente imagen:

Imagen 7.5.1.1-2. Ensayo de lixiviación escorias de cobre.



Tal y como se puede apreciar, las cantidades lixiviadas disminuyen con el aumento del valor de pH. En términos generales, se observa que el elemento más soluble es el calcio, con 25,3 y 24,9 ppm a pH 5 y pH 6,7

<sup>220</sup> M.I. Sánchez de Rojas, J. Riviera y M. Frías. *Escorias de cobre: comportamiento puzolánico y fijación de los elementos pesados en morteros*. Instituto Eduardo Torroja (CSIC). 2004.

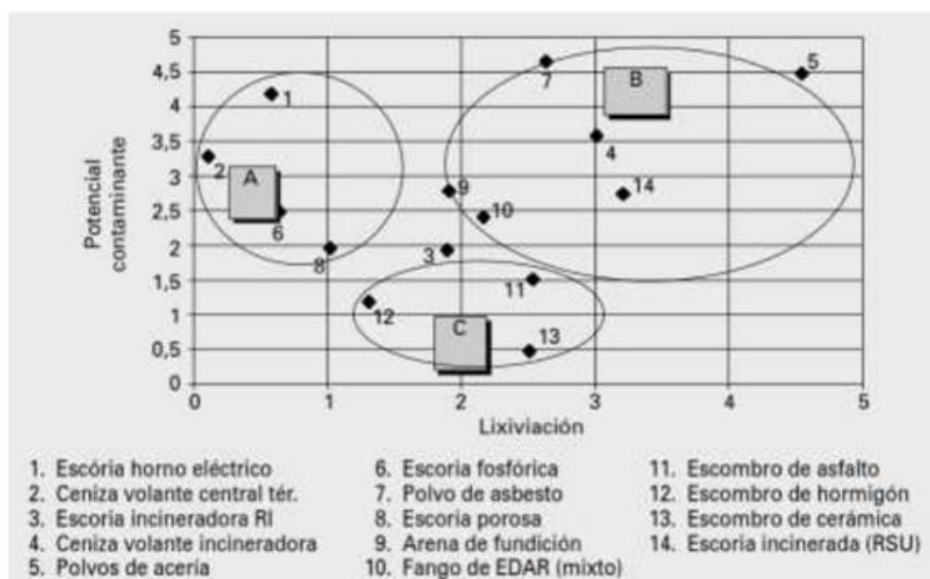
respectivamente, esto se debe a que para ambos valores de pH el calcio se encuentra como  $\text{Ca}^{2+}$ , y no como precipitado, seguido del cobre y cinc a pH 5.

El lixiviado de hierro es similar en los dos pH ya que, para ambos valores de pH, el hierro puede estar mayoritariamente en disolución. Elementos como el cobre, cinc y plomo lixivian de forma diferente según el pH, así el ion cobre a  $\text{pH} > 5$  puede precipitar como  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  o  $\text{CuO}$ , por lo que los valores en el lixiviado difieren significativamente para los dos pH considerados, de forma que a pH 5 la concentración de cobre en el lixiviado es 440 veces superior que a pH 6,7. En el caso del cinc ocurre algo similar, ya que este elemento puede estar a partir de pH 6 en forma de precipitado de  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ , por lo que a pH 6,7 la concentración de  $\text{Zn}^{2+}$  es 20 veces inferior que a pH 5. Igualmente, a  $\text{pH} < 7$  la especie predominante del plomo es  $\text{Pb}^{2+}$ , por lo que también existen diferencias en los valores de lixiviación, ya que a pH 6,7 el plomo puede estar en mayor medida en forma de hidróxido que a pH 5.

En consecuencia, los resultados evidencian cambios en el comportamiento del lixiviado de la escoria en función del pH, aumentando cuanto más ácido es el medio en la mayoría de los elementos.

Así mismo, se ha tenido acceso a un estudio internacional<sup>221</sup> que estudia la viabilidad de la escoria de cobre para su utilización en tratamientos superficiales asfálticos de carreteras. En su apartado 5.3 *Evaluación de riesgos ambientales de la escoria de cobre*, expone la siguiente ilustración:

**Imagen 7.5.1.1-3. Potencial contaminante vs lixiviación de diferentes residuos industriales**



<sup>221</sup> Yaichi Esteban Andrés Pérez Mejías. *Utilización de Escorias de Cobre de Codelco Ventanas como Agregado Pétreo para Tratamientos Superficiales Asfálticos Simples en la Región de Valparaíso. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso-Chile. Enero 2017.*



Según el estudio, la escoria de cobre pertenece al nivel A (1. *Escoria de horno eléctrico*), donde se encuentran las estructuras bien ligadas. Si bien se observa un alto potencial contaminante, el valor correspondiente a la lixiviación es muy bajo. Este nivel indica que un residuo es apto para usos a granel (no ligados), ya que se encuentran total o parcialmente vitrificados, por lo que los diversos contaminantes que componen el residuo difícilmente saldrán al entorno, siendo apto para la construcción de terraplenes, rellenos, subbases de carreteras, etc., sin que se presenten problemas significativos. El nivel B corresponde a residuos que se le deben aplicar un tratamiento severo de inmovilización, mientras que el nivel C corresponde a estructuras poco ligadas que requieren tratamientos físicos y/o químicos.

La baja capacidad de lixiviación se confirma en otros estudios<sup>222</sup> que señalan que, debido a los bajos contenidos en metales pesados en los eluatos, la escoria de cobre no supone un riesgo medioambiental significativo pudiendo ser utilizada en la industria de la construcción y en ingeniería civil.

## 7.5.2 Otros usos

### 7.5.2.1 Como materia prima en la fabricación de productos de construcción

Cabe esperar que los posibles impactos ambientales derivados del uso de la escoria en el uso como materia prima en la fabricación de productos de la construcción, concretamente en la fabricación de clínker, sean notablemente inferiores a los de las aplicaciones no ligadas, debido al encapsulamiento de la escoria en la matriz cementante.

A este respecto, la información facilitada por Atlantic Copper incluye una tabla comparativa entre la composición de dos tipos de clínker, el primero fabricado sin emplear silicato de hierro y el segundo fabricado con silicato de hierro (escoria de cobre), cuyos resultados se muestran a continuación indicando en negrita aquellos valores que se incrementan respecto al clínker sin utilización de escoria. Cabe señalar que se desconoce el origen de los datos aportados, así como si han sido realizados por un laboratorio acreditado.

**Tabla 7.5.2.1-1. Composición clínker sin y con silicato de hierro. Atlantic Copper.**

| Elemento                       | Clínker sin silicato de hierro | Clínker con silicato de hierro | Uds |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,42                           | 4,78                           | %   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,66                           | 3,09                           | %   |
| CaO                            | 65,27                          | <b>65,63</b>                   | %   |
| MgO                            | 1,53                           | 1,53                           | %   |
| SO <sub>3</sub>                | 1,17                           | <b>1,76</b>                    | %   |
| K <sub>2</sub> O               | 0,98                           | 0,93                           | %   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,16                           | 0,09                           | %   |
| Sc                             | <1                             | <1                             | ppm |
| V                              | 294,8                          | 184,7                          | ppm |

<sup>222</sup> Mizerna, Kamila. *Mobility of heavy metals from metallurgical waste in the context of sustainable waste management, Economic and Environmental Studies (E&ES), ISSN 2081-8319, Opole University, Faculty of Economics, Opole, Vol. 16, Iss. 4, pp. 819-830. Polonia. 2016.*

| Elemento | Clínker sin silicato de hierro | Clínker con silicato de hierro | Uds |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|-----|
| Cr       | 174,6                          | <b>184,5</b>                   | ppm |
| Mn       | 327,9                          | 297,5                          | ppm |
| Co       | 10,7                           | <b>12,6</b>                    | ppm |
| Ni       | 70,1                           | 55,4                           | ppm |
| Cu       | 82,4                           | <b>116,4</b>                   | ppm |
| Zn       | 213                            | 88                             | ppm |
| Ga       | 6,1                            | 2,8                            | ppm |
| Ge       | <1                             | <1                             | ppm |
| As       | 39,6                           | 6,1                            | ppm |
| Se       | 0,3                            | <1                             | ppm |
| Br       | <1                             | 0,3                            | ppm |
| Rb       | 41,6                           | 18,7                           | ppm |
| Sr       | 588,5                          | 361,6                          | ppm |
| Y        | 11,4                           | 5,6                            | ppm |
| Zr       | 69,8                           | <b>139,6</b>                   | ppm |
| Nb       | 4,5                            | 2,6                            | ppm |
| Mo       | 5,2                            | <b>23,3</b>                    | ppm |
| Ag       | 2,2                            | <1                             | ppm |
| Cd       | <1                             | <1                             | ppm |
| Sn       | <1                             | <1                             | ppm |
| Sb       | 3,4                            | <b>6,8</b>                     | ppm |
| Te       | <1                             | <1                             | ppm |
| I        | <1                             | <1                             | ppm |
| Cs       | 0,9                            | <b>10,7</b>                    | ppm |
| Ba       | 187,6                          | <b>196,7</b>                   | ppm |
| La       | 21,3                           | <b>26,8</b>                    | ppm |
| Ce       | 46,2                           | <b>56,5</b>                    | ppm |
| Nd       | 17                             | <b>24,2</b>                    | ppm |
| Sm       | 4,5                            | 2,4                            | ppm |
| Yb       | <1                             | <b>7</b>                       | ppm |
| Hf       | <1                             | <b>1,5</b>                     | ppm |
| Ta       | 0                              | <1                             | ppm |
| W        | 11,5                           | 3,8                            | ppm |
| Hg       | <1                             | <1                             | ppm |
| Tl       | <1                             | 0,7                            | ppm |
| Pb       | 89,4                           | 9,2                            | ppm |
| Bi       | 0,7                            | <1                             | ppm |
| Th       | 5,3                            | <1                             | ppm |
| U        | 4,6                            | <1                             | ppm |

Tal y como puede apreciarse, a pesar de que algunos elementos incrementan su presencia en el clínker fabricado con silicato de hierro (escoria de cobre), especialmente el molibdeno, el circonio o el cobre, la mayoría de los compuestos se encuentran en el mismo orden de magnitud.

Según la bibliografía consultada<sup>223</sup>, el contenido de metales pesados en el clínker corresponde con los metales aportados por la escoria. El balance de materia de los metales pesados, basados en los resultados del estudio, indica que el 100% del Zn, Cu, Mo y Ti es incorporado a la estructura cristalina del clínker, mientras que solo el 15% del Pb es retenido en el clínker.

Se apunta que, aunque la volatilidad del plomo representa un grave problema ambiental, el estudio fue realizado en un circuito abierto y a nivel laboratorio, y que actualmente los minerales de cobre que se procesan en las plantas de fundición están libres de plomo. El estudio concluye que el proceso de fabricación de clínker para cemento puede ser una alternativa económica, técnica y ambientalmente atractiva para el coprocesamiento de la escoria de cobre. No obstante, con objeto de reducir el riesgo asociado a la volatilidad del plomo y azufre (para el control de las emisiones), el estudio aconseja que el uso de la escoria de cobre se encuentre limitado para estos dos parámetros o seleccionar aquellas escorias que se encuentren libres de plomo.

En cuanto a los posibles fenómenos de lixiviación, únicamente se han identificado documentos cuando ésta es utilizada en la fabricación de cemento, y no formando parte del clínker. No obstante, según los documentos consultados<sup>224</sup>, elementos como el Cu, Fe y Zn, presentes en la escoria y en su lixiviado, arrojan unas concentraciones prácticamente nulas en el lixiviado del mortero con escoria. Otros como el Cd, Co, Cr, Mn, Ni y Hg presentan una concentración inferior al límite de detección de laboratorio. Únicamente el Ca y ciertos compuestos alcalinos incrementan su presencia en el lixiviado debido a la reacción puzolánica. Por tanto, se constata una baja liberación cuando la escoria de cobre se encuentra embebida en una matriz.

#### 7.5.2.2 Como material abrasivo

Según la documentación facilitada por Atlantic Copper, la escoria de cobre se emplea de igual manera que cualquier otro material abrasivo. Una vez utilizado, un gestor autorizado de residuos se encarga de la gestión del material resultante del chorreado de superficies, por lo que su utilización no implica ningún impacto ambiental distinto de cualquier otro material en este sentido.

No obstante, la utilización como abrasivo puede romper las estructuras de vidrio del silicato provocando la liberación de metales pesados a la atmósfera en forma de polvo o aerosol. En esta línea se encuentran distintas recomendaciones, documentos y guías como la Guía de la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) del Departamento de Trabajo de Estados Unidos<sup>225</sup> "*Abrasive Blasting Hazards in Shipyard Employment*", que considera diferentes investigaciones<sup>226</sup> que han informado que el chorreado

---

<sup>223</sup> L. E. García Medina, E. Orrantia Borunda, A. Aguilar Elguézabal. *Uso de la escoria de cobre en el proceso de fabricación de clínker para cemento portland*. 2006.

<sup>224</sup> M.I. Sánchez de Rojas, J. Rivera, M. Frías, J.L. Esteban y M. Olaya. *Leaching Characteristics of Blended Mortars Containing Copper Slags*. 2004.

<sup>225</sup> [https://www.osha.gov/dts/maritime/standards/guidance/shipyard\\_guidance.html](https://www.osha.gov/dts/maritime/standards/guidance/shipyard_guidance.html)

<sup>226</sup> Montana Tech of the University of Montana. "*Airborne Exposure to Heavy Metals and Total Particulate During Abrasive Blasting Using Copper Slag Abrasive*". D. Stephenson, T. Spear, M. Seymour and L. Cashell. 2002.

abrasivo con escoria de cobre puede generar niveles de arsénico, cromo y plomo superiores a los límites de exposición dictados por la OSHA fijados en 10, 500 y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de aire respectivamente.

Esta afirmación se encuentra en línea con otros documentos<sup>227</sup> que testifican que la escoria de cobre tiene mayores concentraciones medias en el aire, al utilizarse como abrasivo, que la arena de sílice tradicionalmente usada, para varios de los agentes peligrosos para la salud humana, comprendiendo elementos tales como arsénico, cadmio, plomo o plata. No obstante, se puntualiza que estos datos fueron constatados en laboratorio y para muestras de una misma escoria, por lo que sólo pueden tomarse como indicativos antes de obtener cualquier conclusión general.

Por todo lo anterior, parece imperativo la necesidad de implantar un sistema de gestión de seguridad y salud que permita controlar y reducir la posible afección a la salud humana y al medio ambiente durante las actividades de abrasión con escoria de cobre tratada.

Según indicaciones de Atlantic Copper, las instalaciones del receptor de la escoria de cobre para este uso, cuentan con un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Laboral conforme a la norma OHSAS 18001:2007, reemplazada actualmente por la ISO 45001:2018<sup>228</sup>, aplicable a las actividades de a) tratamiento superficial y aplicación de pinturas en tanques estructurales de carga y lastre y en otras estructuras del buque, y b) tratamiento superficial y aplicación de pinturas en otras estructuras metálicas.

El sistema incluye instrucciones de trabajo para la realización de las actividades de chorro a presión (granallado) e incorpora las fases de trabajo y los equipos de protección individual (EPI) obligatorios para su ejecución. Entre los EPI figuran buzos de trabajo específico para tareas de granallado, botas de seguridad, guantes de protección específicos para tareas de granallado, caretas de protección con línea de aire (careta de chorro), estación de filtrado de aire, mascarillas autofiltrantes, protectores auditivos (tapones), entre otros.

### **Conclusiones. Consideraciones ambientales y sobre la salud humana de las escorias de cobre**

La escoria de cobre se encuentra registrada bajo el *Reglamento REACH* y *no cumple* con los criterios para ser clasificada como peligrosa conforme al *Reglamento sobre la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP)*.

Posee un gran contenido de hierro y sílice procedente de sus componentes principales. También se evidencian concentraciones notables de cobre, zinc y aluminio y, en menor medida, de arsénico y plomo. No obstante, al tratarse de un residuo sólido y debido a sus características físicas y químicas, la lixiviación es el principal sistema potencial de emisión contaminante.

---

<sup>227</sup> Department of Health and Human Services, "Evaluation of Substitute Materials for Silica Sand in Abrasive Blasting". Pittsburgh, Pennsylvania 1998.

<sup>228</sup> ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems- Requirements with guidance for use.

En relación a su comportamiento ambiental durante su empleo en aplicaciones no ligadas, pese a que los resultados analíticos del lixiviado de la escoria de cobre mediante los ensayos de volteo, realizados por el CEDEX y por AGQ, muestran concentraciones de metales y sales por debajo de los valores límite de admisión en vertederos para residuos inertes, en los ensayos de columna realizados por el CEDEX, ciertos elementos metálicos superan los valores de referencia.

En concreto, las concentraciones de **cobre, molibdeno y antimonio superan los valores límite de admisión en vertederos para residuos inertes**, aunque el valor medio del cobre sí cumpliría con dichos límites. En el caso del **molibdeno**, la concentración supera también el **valor límite de residuos no peligrosos**. Si bien en los ensayos de columna realizados por AGQ la mayor parte de los parámetros se mantienen por debajo de los límites de referencia, **el molibdeno supera el límite de vertedero para residuos inertes**.

Estas conclusiones concuerdan con las obtenidas tras la comparativa realizada con los valores límite establecidos en el Reglamento de materiales de la construcción sustitutivos de Alemania (pese a ser meramente orientativa al estar basados en distinta relación L/S).

Según lo anterior, ciertos parámetros como cobre, molibdeno y antimonio presentan una capacidad de lixiviación que podría, en algún caso, ser superior a los valores límite considerados como referencia, por lo que sería necesario establecer un control y seguimiento para estos parámetros.

Si bien es cierto que no se pueden extrapolar los resultados obtenidos en unos ensayos de lixiviación para predecir su comportamiento ambiental a escala real, se ha analizado el escenario de aplicación en el que se pretende utilizar, que se corresponde con su uso como árido en rellenos de zanjas de tubería.

En este tipo de usos, que consisten en instalaciones sobre las que discurre agua, existe una cierta probabilidad de fuga o rotura, que implicaría el contacto directo de la escoria de cobre con agua, pudiéndose incrementar el riesgo de lixiviación de estos metales.

En este sentido, en países como Flandes, con una extensa experiencia en el uso de la escoria de cobre para diversas aplicaciones ligadas y no ligadas, se constata como uso mayoritario de estas escorias su empleo como materia prima en la fabricación de productos de construcción (90% de la escoria destinada a este fin), concretamente como árido fino en la fabricación de hormigón, y no se contempla su uso en aplicaciones no ligadas tales como relleno, terraplenes o instalaciones de drenaje.

Finalmente, aunque según la bibliografía consultada, la liberación de elementos por lixiviación en la escoria de cobre es limitada debido a una reducida solubilidad en agua de los metales traza presentes en la matriz, firmemente interconectados entre sí en las estructuras de vidrio del silicato y otras fases minerales, la susceptibilidad de las escorias de cobre a ser lixiviadas depende tanto de su química como de su mineralogía, jugando un papel principal el lixiviado de metales de la fase mineral.

Es por ello por lo que ciertos documentos señalan la necesidad de considerar por separado e individualmente el comportamiento de las escorias para prevenir la contaminación potencial del medio ambiente, así como la consideración de los cambios que pueden producirse en el comportamiento del lixiviado de la escoria en función del pH, aumentando cuanto más ácido es el medio en la mayoría de los elementos.

Por todo lo expuesto anteriormente, **el uso de las escorias de cobre como árido para el relleno de zanjas para la instalación de tuberías (aplicaciones no ligadas) no se puede considerar seguro.**

En relación a su uso como **material abrasivo**, la escoria de cobre se emplea de igual manera que cualquier otro material destinado a tal fin, por lo que su utilización no debería implicar ningún impacto ambiental distinto de cualquier otro material en este sentido, siendo una vez utilizado gestionado por un gestor autorizado.

No obstante, la utilización como abrasivo de la escoria de cobre puede romper las estructuras de vidrio del silicato provocando la liberación de metales pesados como arsénico, cromo y plomo, pudiendo superar los límites de exposición dictados por la OSHA. Según ciertos documentos, la escoria de cobre tiene mayores concentraciones medias en el aire, al utilizarse como abrasivo, que la arena de sílice tradicionalmente usada, para varios de los agentes peligrosos para la salud humana, comprendiendo elementos tales como arsénico, cadmio, plomo o plata. Si bien se señala que estos datos fueron constatados en laboratorio y para muestras de una misma escoria, por lo que sólo pueden tomarse como indicativos.

Es por ello que, para garantizar un uso seguro de la escoria de cobre como material abrasivo **se considera necesario la implantación de un sistema de gestión de seguridad y salud que garantice el cumplimiento de las obligaciones sobre salud y seguridad en el trabajo y reduzca la posible afección a la salud humana y al medio ambiente durante las actividades de abrasión con escoria de cobre.**

En cuanto al uso de la escoria de cobre **en la fabricación de clínker, cabe esperar que los posibles impactos ambientales y a la salud humana derivados del uso de la escoria sean notablemente inferiores a los que cabría esperar en aplicaciones no ligadas**, debido al encapsulamiento de la escoria en la matriz cementante. Según la información facilitada, ciertos elementos incrementan su presencia en el clínker fabricado con silicato de hierro (escoria de cobre) respecto a un clínker fabricado sin escoria, especialmente el molibdeno, el circonio o el cobre, aunque la mayoría de los compuestos se encuentran en el mismo orden de magnitud.

## 8. REQUISITOS NORMATIVOS O ESTÁNDARES

Las principales especificaciones técnicas identificadas se recogen a continuación en función del tipo de aplicación, previo análisis del *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 y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo, , y del Reglamento (CE) 1907/2006, de 18 de diciembre, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH)*. Por último, se recogen las normas europeas armonizadas identificadas relacionadas con las diferentes aplicaciones ligadas y no ligadas en las que pueden emplearse las escorias del presente estudio.

En general, existe suficiente normativa técnica de ámbito nacional para el uso de las escorias, tanto para aplicaciones ligadas como no ligadas, establecida principalmente en las normas de construcción de carreteras como el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*, en sus distintos artículos, pero también en otras normas como el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios (PF)* y como la *Instrucción del Hormigón Estructural (EHE-08)* o la *Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16)* para aplicaciones ligadas en concreto.

La mayoría de estas normas prevén únicamente la utilización de áridos o escorias siderúrgicas, es decir, de aquellas escorias procedentes de procesos de fundición ferrosos como las escorias negras y blancas, pero no se contemplan de forma explícita aquellas que tienen su origen en procesos de fundición no ferrosos, como las escorias de cobre o de las ferroaleaciones, como las escorias de silicomanganeso.

Igualmente, cabe señalar que estas normas recogen generalmente la necesidad de acreditar la idoneidad de los materiales utilizados mediante el mercado CE.

### 8.1 REGLAMENTO DE PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN

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 y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo*, fija las condiciones para la introducción en el mercado o comercialización de los productos de construcción, estableciendo reglas armonizadas sobre cómo expresar las prestaciones de los productos de construcción en relación con sus características esenciales y sobre el uso del mercado CE en dichos productos.

Según lo dispuesto en el reglamento, cuando un producto de la construcción esté cubierto por una norma europea armonizada, el fabricante deberá emitir una **declaración de prestaciones cuando dicho producto se introduzca en el mercado**. Al emitir la declaración de prestaciones el fabricante asumirá la responsabilidad de la conformidad del producto de construcción con la prestación declarada (art. 4).

Para aquellos productos que no están totalmente cubiertos por estándares europeos armonizados, el reglamento permite al fabricante de un producto de la construcción la posibilidad de elaborar una declaración de prestaciones de manera voluntaria.

En este caso, es necesario comprobar antes si está cubierto por algún documento de evaluación europeo<sup>229</sup> (DEE). También puede consultarse el contenido del documento, incluyendo su campo de aplicación, en la página web de la European Organisation for Technical Assessment (EOTA). Si el producto entra en el campo de aplicación de alguno de estos documentos, se puede solicitar a un organismo de evaluación técnica (OET) que evalúe el producto con fines de marcado CE. Si el producto y su uso, o usos previstos, no están cubiertos por ningún documento de evaluación europeo, se puede solicitar a un organismo de evaluación técnica que elabore uno específico para el producto.

Entre otros aspectos, una declaración de prestaciones deberá contener la siguiente información:

- referencia del producto;
- sistemas de evaluación y verificación de la coherencia del rendimiento del producto;
- referencia de la norma armonizada aplicable o de la Evaluación Técnica Europea;
- uso o usos previstos del producto;
- rendimiento declarado basado en la evaluación según la norma armonizada aplicable o la Evaluación Técnica Europea.

Cuando un producto de la construcción tiene una declaración de prestaciones, está sujeto a la obligación de la marca CE. Por el contrario, si un fabricante no ha emitido una declaración de prestaciones, no podrá colocar el marcado CE.

#### ○ **Marcado CE**

El propósito de la marca CE es doble, promover el libre comercio dentro de los EEMM de la UE, así como el aumento de seguridad en el uso de los productos. El marcado CE no es una marca de calidad, sino que certifica que un producto **cumple los requisitos esenciales de salud y seguridad de los productos de la construcción y demás normativas armonizadas de la UE**. Los contenidos específicos de la marca CE depende, por tanto, de la aplicación o el producto y se especifica en las normas pertinentes.

En algunos casos, el marcado CE no es obligatorio, aunque el producto y su uso previsto entren en el ámbito de aplicación de alguna norma armonizada. Estas exenciones se aplican a los productos de fabricación individual o hechos a medida para un uso determinado, o a los elaborados mediante procesos tradicionales que garanticen la conservación de las obras de protección oficial (patrimonio, edificios históricos, etc.). Para acogerse a alguna de estas exenciones, es preciso asegurarse de que puede aplicarse al producto en cuestión.

Los principios generales del marcado CE figuran en el *Reglamento (CE) N° 765/2008, de 9 de julio*<sup>230</sup>. Los fabricantes o sus representantes en la Unión Europea son los únicos responsables de que sus productos sean

---

<sup>229</sup> ETE: Evaluación Técnica Europea (ETA en sus siglas en inglés; en la Directiva sobre productos de construcción se utilizan las mismas siglas para la Aprobación Técnica Europea - European Technical Approval).

<sup>230</sup> Reglamento (CE) N° 765/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de julio, por el que se establecen los requisitos de acreditación y vigilancia del mercado relativos a la comercialización de los productos y por el que se deroga el Reglamento (CEE) n° 339/93.



conformes a las disposiciones del reglamento de productos de la construcción tanto para su comercio como para su uso propio. Cuando un fabricante identifica un producto con el marcado CE, indica que este es conforme a las normas armonizadas y, por tanto, cumple los requisitos esenciales del reglamento.

Existen diversas guías e instrucciones, que se han ido elaborando por el actual Ministerio de Industria, Comercio y Turismo durante las últimas décadas, donde se aclaran y especifican los criterios a seguir en la puesta en práctica del marcado CE en productos de la construcción tales como los áridos<sup>231</sup>, los morteros<sup>232</sup> o el cemento<sup>233</sup>.

- **Evaluación y verificación de las prestaciones**

En el Anexo V del reglamento de productos de la construcción se establecen los requisitos de evaluación y verificación de la conformidad de las prestaciones de los productos de la construcción.

El fabricante es responsable de evaluar las prestaciones del producto y de poner en marcha el control de producción en fábrica, ya sea mediante sus procedimientos internos para el control de la calidad como con la colaboración de laboratorios externos o de proveedores de servicios. Los resultados de la evaluación y del control de producción en fábrica permiten verificar si las prestaciones se mantienen sin cambios en el transcurso del tiempo. El término legal para describir este proceso es «evaluación y verificación de la constancia de las prestaciones» (EVCP<sup>234</sup>) y los verificadores externos son los organismos notificados<sup>235</sup>.

La evaluación y verificación de los productos se efectúa mediante la definición del valor de una serie de características del producto que se denominan características esenciales. A cada característica esencial le aplica un sistema EVCP. En la tabla imagen se muestran las tareas que corresponden al fabricante y a los organismos notificados, respectivamente, dependiendo del sistema EVCP que aplique:

---

<sup>231</sup> Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Instrucción sobre criterios para la puesta en práctica del marcado CE de los áridos. 2004

<sup>232</sup> Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Instrucción sobre los criterios para la puesta en práctica del marcado CE de los morteros para albañilería. 2016.

<sup>233</sup> Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. Guía sobre criterios para la puesta en práctica del marcado CE de cementos. 2016.

<sup>234</sup> En la Directiva sobre productos de construcción, el término utilizado es EdC (evaluación de la conformidad).

<sup>235</sup> La página web del sistema de información NANDO (Sistema de información sobre organismos modificados y designados de nuevo enfoque), incluye el registro oficial de organismos notificados por los EEMM para llevar a cabo las tareas correspondientes a las terceras partes

Imagen 8.1-1. Sistemas EVCP. Obligaciones del fabricante y del organismo notificado<sup>236</sup>.



Si todas las características del producto se encuadran en el sistema 4, no es necesaria la intervención de un organismo notificado. Si se encuadran en el sistema 3, el producto debe someterse a ensayo por parte de un organismo (en este caso, un laboratorio) notificado, que puede ser diferente para cada característica esencial. Si corresponden a los sistemas 1, 1+ o 2+, el organismo notificado colabora con el fabricante durante la evaluación y ejerce algunas tareas en la fábrica.

○ **Valoración de sustancias peligrosas en los productos de la construcción**

Además de los requisitos especificados en las normas técnicas armonizadas de producto que regulan el uso de los materiales de la construcción, como son la resistencia mecánica y la estabilidad, la seguridad en caso de incendio, la seguridad y accesibilidad en el uso, la protección contra el ruido, la economía de la energía y la retención del calor. En el Anexo I del reglamento figura la necesidad de establecer criterios de higiene, salud y medio ambiente y criterios de utilización sostenible de los recursos naturales:

6. *Las obras de construcción deberán proyectarse y construirse de forma que, en todo su ciclo de vida, no supongan una amenaza para la higiene, la salud o la seguridad de los trabajadores, ocupantes o vecinos, ni tengan un impacto excesivamente elevado durante todo su ciclo de vida sobre la calidad del medio ambiente ni sobre el clima durante su construcción, uso y demolición, en particular como consecuencia de cualquiera de las siguientes circunstancias:*

<sup>236</sup> Comisión Europea. Mercado CE de los productos de construcción paso a paso. 2015. [https://ec.europa.eu/growth/content/ce-marking-construction-products-step-step-guide-now-available-all-eu-languages-0\\_en](https://ec.europa.eu/growth/content/ce-marking-construction-products-step-step-guide-now-available-all-eu-languages-0_en)

- d) *liberación de sustancias peligrosas en las aguas subterráneas, las aguas marinas, las aguas superficiales o el suelo*
  - e) *liberación de sustancias peligrosas en el agua potable o sustancias que puedan tener de algún modo repercusiones negativas en la misma;*
7. *Las obras de construcción deberán proyectarse, construirse y demolerse de tal forma que la utilización de los recursos naturales sea sostenible y garantice en particular:*
- c) *la utilización de materias primas y materiales secundarios en las obras de construcción que sean compatibles desde el punto de vista medioambiental.*

Para dar cumplimiento a estos requisitos, en la actualidad se están elaborando estándares europeos armonizados relativos a las sustancias peligrosas en productos de construcción, que se explican con mayor detalle en el apartado Normas Europeas Armonizadas del presente estudio.

Pese a ello, en las normas de producto todavía no se han implementado estos requisitos que se refieren a “Salud, higiene y medio ambiente” (Requisito Esencial 3) que describirían las características referidas al comportamiento ambiental para el mercado CE.

Por otra parte, en el reglamento se indica que la información acerca del contenido de sustancias peligrosas en los productos de la construcción se limitará en principio a las sustancias a las que se refieren los artículos 31 y 33 del *Reglamento REACH*. En este sentido, de acuerdo con el artículo 6(5) del reglamento de productos de la construcción, junto con la declaración de prestaciones se deberá facilitar la ficha de datos de seguridad.

Sin embargo, de acuerdo con el *REACH*, el desarrollo de una ficha de datos de seguridad (FDS) no es obligatorio en todos los casos. Únicamente los productos que son sustancias o mezclas bajo dicho reglamento y que pertenecen al grupo de sustancias peligrosas para la salud humana y el medioambiente, deberán suministrar la correspondiente ficha de datos de seguridad. Es decir, esta obligación no es aplicable a los productos que son artículos. En consecuencia, se puede considerar que las obligaciones establecidas bajo el reglamento actualmente no constituyen un vehículo de información sobre el contenido de sustancias peligrosas en todos los productos de la construcción debido a que la FDS no siempre es obligatoria bajo el *Reglamento REACH*<sup>237</sup>.

No obstante, tal y como se ha indicado anteriormente, las escorias se han registrado en *REACH* como sustancias UVCB, por lo que, en este caso, la declaración de prestaciones deberá ir acompañada de su correspondiente FDS.

---

<sup>237</sup> *Reglamento (CE) nº 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de diciembre de 2006, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH), por el que se crea la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos, se modifica la Directiva 1999/45/CE y se derogan el Reglamento (CEE) nº 793/93 del Consejo y el Reglamento (CE) nº 1488/94 de la Comisión así como la Directiva 76/769/CEE del Consejo y las Directivas 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE y 2000/21/C*

Además, de acuerdo con el artículo 33 del *Reglamento REACH*, para los productos de construcción que sean artículos, los proveedores tienen el deber de transmitir en la cadena de suministro suficiente información para permitir un uso seguro, incluido, como mínimo, el nombre de la sustancia en el caso de las sustancias extremadamente preocupantes si están presentes en el artículo en una concentración superior al 0,1 % p/p. La misma información debe también proporcionarse a los consumidores previa solicitud. Adicionalmente, los productores o importadores de artículos que lleven sustancias extremadamente preocupantes deben notificarlo a la *Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA)* si se cumplen determinadas condiciones. Puede restringirse<sup>238</sup> la fabricación, la comercialización y el uso de determinadas sustancias, mezclas y artículos peligrosos.

Por lo tanto, esta información (fichas de datos de seguridad para sustancias peligrosas o información sobre sustancias peligrosas contenidas en el producto de construcción) acompaña al producto de construcción en todos los pasos de la cadena de suministro hasta el usuario final (contratista, trabajador y consumidor).

## 8.2 REGLAMENTO REACH

El *Reglamento (CE) 1907/2006, de 18 de diciembre, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH)*, tiene como objetivos garantizar un nivel elevado de la protección de la salud humana y el medio ambiente, garantizar la libre circulación de sustancias como tales, en forma de preparados o contenidas en artículos, fomentar la competitividad, la innovación y el desarrollo de métodos alternativos y fomentar y garantizar que las sustancias altamente preocupantes puedan ser sustituidas por otras sustancias o tecnologías menos peligrosas.

El registro supone generar y presentar toda la información disponible sobre la sustancia incluyendo las propiedades, los usos, los peligros y los riesgos potenciales que presenta. Esta información debe ser comunicada a la ECHA mediante un expediente de registro.

El *Reglamento REACH* no aplica a los residuos, por lo que no tienen que registrarse ni cumplir con las disposiciones en relación con la información a proporcionar a lo largo de la cadena de suministro. No obstante, esto no significa que las sustancias contenidas en los residuos estén totalmente exentas de *REACH*. Los fabricantes o importadores de una sustancia, en forma de mezcla o contenidas en artículos (sustancia) sujeta a registro en virtud de *REACH*, están obligados a tener en cuenta la fase del ciclo de vida de residuo cuando se lleven a cabo las valoraciones adecuadas.

En cuanto a las sustancias recuperadas sólo deben entenderse como sustancias que formaban parte de materiales residuales y han dejado de ser residuos con arreglo a la Directiva Marco de Residuos, por lo que

---

<sup>238</sup> Algunas de las restricciones que contempla el anexo XVII del Reglamento REACH son aplicables a los productos de construcción. Cabe citar, por ejemplo, la entrada 19 sobre los compuestos de arsénico, la entrada 31 sobre la creosota (que restringe su uso para el tratamiento de la madera con algunas excepciones) y la entrada 47 sobre el cromo VI (que restringe su uso en el cemento y las mezclas que contienen cemento, pero con excepciones cuando se utiliza en procesos controlados, cerrados y totalmente automatizados).

les aplica el *Reglamento REACH*. La exención de registro de las sustancias recuperadas en virtud del artículo 2, apartado 7, letra d) se basa en la condición de que la misma sustancia ya se haya registrado previamente. Esta exención no aplica a los subproductos, aunque éstos pueden quedar exentos de registro a condición de que no sean importados o comercializados como tales.

Para valorar los requisitos de registro de los materiales recuperados, es esencial distinguir si el material en cuestión es una sustancia como tal, una mezcla (que contiene dos o más sustancias combinadas) o un artículo.

En el artículo 3, apartado 3, de *REACH* se define un artículo como «un objeto que, durante su fabricación, recibe una forma, superficie o diseño especiales que determinan su función en mayor medida que su composición química.» Si la forma, la superficie o el diseño son igual de importantes o menos que la composición química, se trata de una sustancia o una mezcla. Si no se puede decidir sin ambigüedades si un objeto cumple la definición de artículo de *REACH*, será necesario realizar una valoración más detallada.

Así mismo, el "*Documento de orientación sobre residuos y sustancias recuperadas. Versión 2.*" de 2010 de la ECHA, entiende por áridos recuperados los áridos resultantes del procesado de material inorgánico previamente utilizado en la construcción (p. ej. hormigón, piedras), así como determinados áridos de origen mineral resultantes de un proceso industrial que implica una modificación térmica o de otro tipo, como la escoria no procesada o residuos derivados del procesado de escoria.

En el caso concreto de las escorias ferrosas, el documento indica que la mayor parte de las escorias que produce el sector metalúrgico europeo se registrarán como sustancias UVCB (*Unknown or Variable composition, Complex reaction products or Biological materials*) y se utilizan en aplicaciones como la producción de cementos y productos de hormigón. En esas aplicaciones lo que importa son las propiedades hidráulicas de la escoria, por lo que la característica más importante es su composición química. Por lo tanto, la escoria ferrosa debe considerarse una sustancia y, por analogía, las escorias de otros procesos metalúrgicos deben considerarse también sustancias.

Bajo la interpretación de que no se trata de residuos, tras la entrada en vigor del *Reglamento REACH* en 2007, algunas empresas productoras iniciaron el procedimiento de registro de determinadas escorias, asumiendo de manera general que se trataba de productos. Durante el proceso de registro se evaluaron y discutieron datos de composición de las escorias de los distintos procesos productivos en toda Europa, acordando que la mejor manera de definir el proceso productivo y la composición de éstas era a través de su registro como sustancias UVCB pudiendo utilizar su composición química como información adicional.

Los códigos de identificación de registro de las escorias de fundición objeto del presente estudio, acero al carbono, cobre y silicomanganeso, son los siguientes:

**Tabla 8.2-1. Códigos de identificación de las escorias.**

| Nombre           | NºCAS      | NºEC      | Nº REGISTRO REACH     |
|------------------|------------|-----------|-----------------------|
| Escoria negra    | 91722-10-0 | 932-275-6 | 01-2119485979-09-0078 |
| Escoria blanca   | 65996-71-6 | 266-004-1 | 01-2119487457-23-0063 |
| Escoria SiMn     | 69012-33-5 | 273-733-9 | 01-2119440597-32-0000 |
| Escoria de cobre | 67711-92-6 | 266-968-3 | 01-2119513228-45-0003 |

### 8.3 NORMATIVA DE PROTECCIÓN FRENTE A LA EXPOSICIÓN LABORAL A SUSTANCIAS CANCERÍGENAS

La D.G. de Calidad y Evaluación Ambiental remitió al Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) una solicitud de asesoramiento técnico en relación a la evaluación de los posibles futuros criterios de fin de condición de residuo para las distintas tipologías de escorias, al resultar preocupante que algunas de estas escorias puedan contener elementos clasificados como cancerígenos por la legislación en salud laboral (como el Cromo/Cromo Hexavalente), cuyas conclusiones se indican a continuación.

El Real Decreto 665/1997<sup>239</sup>, de 12 de mayo, tiene por objeto, en el marco de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, la protección de los trabajadores contra los riesgos para su salud y su seguridad derivados o que puedan derivarse de la exposición a agentes cancerígenos o mutágenos durante el trabajo, así como la prevención de dichos riesgos.

El ámbito de aplicación de este real decreto se condiciona a la exposición del agente cancerígeno o mutágeno como consecuencia de la realización de alguna actividad que se lleva a cabo en el centro de trabajo. Por lo tanto, es aplicable siempre que se produzca alguna de las circunstancias siguientes:

- Cuando se emplea como materia prima, se fabrica, se genera como producto intermedio, residuo, impureza o por reacción no deseada o se forma o interviene por cualquier motivo en el proceso laboral básico y las actividades relacionadas con él (mantenimiento, manutención, almacenamiento, reparación, etc.).
- Cuando se utiliza, se forma o se libera al ambiente en el transcurso de las actividades no ligadas al proceso laboral básico (limpieza, desinfección, obras y modificaciones, etc.).
- Cuando se almacena de forma temporal o permanente en los lugares de trabajo.

Por otra parte, el Reglamento (CE) nº 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (Reglamento CLP), establece en su anexo I los criterios para la clasificación de un agente como cancerígeno o mutágeno de categoría 1A o 1B.

Las mezclas se pueden clasificar teniendo en cuenta la clasificación de peligrosidad de los distintos componentes de estas, así como los valores de corte o límites de concentración específicos establecidos en dicho anexo. Según el art. 11 del reglamento CLP, *“cuando una mezcla contenga una sustancia clasificada como peligrosa, bien como componente o en forma de impureza o aditivo identificados, esta información se tendrá en cuenta a efectos de la clasificación cuando la concentración de dicha sustancia sea igual o superior”*.

Según se indica en la *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos o mutágenos durante el trabajo*, desarrollada por el INSST, la aplicación de los

---

<sup>239</sup> Real Decreto 665/1997, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo.

criterios de clasificación que se citan debe efectuarse sin limitaciones, es decir, con independencia de que el agente químico al que se apliquen esté individualmente clasificado o no en esta normativa, de que esté o no sometido a sus disposiciones, o de que esté o no comercializado, como podría ser el caso de productos intermedios, mezclas de sustancias en forma de residuos, o sustancias o mezclas sometidas a normativas particulares.

No obstante, existen sustancias y mezclas, objeto de regulaciones específicas, para las que no es de aplicación el Reglamento CLP, por ejemplo, los residuos, siempre que su legislación específica establezca para esas sustancias o mezclas peligrosas normas de clasificación y etiquetado que garanticen el mismo nivel de información y de protección que estas disposiciones. En este caso deberá aplicarse el Real Decreto 665/1997, de 12 de mayo, siempre que, en una posible exposición laboral a los mismos, alguno de sus componentes cumpla los criterios de clasificación como cancerígeno o mutágeno de categoría 1A o 1B.

Hay que tener en cuenta que el Reglamento CLP establece, en determinadas ocasiones, unos límites de concentración específicos, por lo que, desde el punto de vista legal, cuando las sustancias cancerígenas presentes en la escoria se encuentren por debajo de esos límites no se le daría la consideración de cancerígena a la escoria.

Según lo expuesto anteriormente, siempre que se utilicen escorias que presenten agentes cancerígenos, como, por ejemplo, cromo hexavalente o berilio (ambos C1B) no eliminados en las operaciones de valorización, existe riesgo de exposición y se debe aplicar el Real Decreto 665/1997, de 12 de mayo. **En el caso concreto de estos dos agentes, ambos clasificados como cancerígenos según el Reglamento CLP, no existen valores de corte ni límites de concentración específicos, por lo que su presencia en las escorias ya las clasificaría como cancerígenas y conduciría a la aplicación de dicho real decreto.**

Se debe entender que existe exposición a un agente químico cuando dicho agente esté presente en el lugar de trabajo y se produce un contacto de este con el trabajador, normalmente por inhalación o por vía dérmica, pero también posible por vía digestiva o parenteral. Aunque, de acuerdo con esta definición, cualquier valor, por pequeño que sea, de la concentración ambiental o de la cantidad del agente químico presente en el lugar de trabajo que entra en contacto con el trabajador, implica la exposición de este, **la posibilidad de que se produzcan daños viene también condicionada directamente por la naturaleza del agente químico.** Por ello, la evaluación de riesgos como proceso informativo determinará en cada caso concreto la mayor o menor relevancia de dicha exposición sobre el nivel de riesgo.

En este sentido, cobra importancia a la hora de evaluar el riesgo de exposición, las características y composición de las escorias, así como los procesos a los que son sometidas y su forma de manipulación. Por ejemplo, el tamaño de partícula en la escoria granulada mucho menor que en la cristalina, por lo que, a priori, y considerando solo las características del agente, el riesgo por inhalación para la escoria granulada parece mayor. Además, la utilización de las escorias en procesos abiertos en actividades en las que la generación de polvo es elevada también aumenta ese riesgo de exposición.

Según indica el Real 665/1997, de 12 de mayo, *“se garantizará que el nivel de exposición de los trabajadores se reduzca a un nivel tan bajo como sea técnicamente posible. La exposición no superará el valor límite de los agentes cancerígenos”*.

En relación con el concepto de valor límite, su aplicación se deberá realizar con los criterios generales (definiciones y consideraciones sobre la valoración) y condiciones particulares para los agentes cancerígenos y mutágenos establecidos en el documento “Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos en España” (edición anual) publicado por el INSST.

Los agentes cancerígenos o mutágenos presentan efectos estocásticos, es decir, efectos que no responden a una relación graduada “exposición - efecto” de la cual pueda deducirse científicamente un umbral de exposición por debajo del cual haya seguridad de que el efecto no se va a producir o no va a sobrepasar un nivel máximo aceptable de intensidad.

Para estos agentes se admite la existencia de una relación “exposición - probabilidad de efecto” que permite deducir que, cuanto más baja sea la exposición a los mismos, menos probable será que se produzcan tales efectos, aunque estos, en caso de producirse, serán siempre de carácter muy grave e irreversible: un cáncer o un cambio permanente en el material genético.

En este sentido habrá que tener en cuenta que los conocimientos científicos actuales no permiten identificar niveles de exposición seguros por debajo de los cuales no exista riesgo de que los agentes mutágenos y la mayoría de los cancerígenos produzcan sus efectos característicos sobre la salud. Por esta razón, los límites de exposición adoptados para algunas de estas sustancias no deben ser considerados como una garantía para la protección de la salud, sino como unas referencias máximas para la adopción de las medidas de protección y el control del ambiente de los puestos de trabajo.

#### **8.4 NORMATIVA DE APLICACIÓN**

En España, las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de áridos en la construcción de capas de firmes de carreteras se encuentran básicamente recogidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y en la normativa UNE EN.

De manera genérica para los dos tipos de aplicaciones evaluadas (ligadas y no ligadas), se han analizado los requisitos técnicos establecidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), ya que en parte de su articulado se ha impulsado la introducción del árido reciclado y artificial como árido alternativo al natural.

En concreto, la Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, por la que se actualizan determinados artículos del PG-3, relativos a firmes y pavimentos, introdujo algunos cambios debido a que (...) *la necesidad de aprovechamiento y/o reutilización de residuos, subproductos, materiales de demolición de firmes, pavimentos y hormigones, etc., tendente al ahorro de recursos naturales y a la minimización de los impactos ambientales, aconsejan una revisión de los artículos correspondientes a capas de firmes y pavimentos de carretera.*



Previamente, la Orden FOM/1382/2002, de 16 de mayo, por la que se actualizan otros artículos del PG-3 (relativos a la construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones)<sup>240</sup> también señalaba que (...) *la aparición de nuevos materiales y técnicas constructivas (...) aconseja la revisión de las especificaciones relativas a la construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones.*

Cabe destacar que las actualizaciones del PG-3 realizadas en este sentido, permiten el uso de los materiales secundarios en algunas aplicaciones, pero sin desarrollar ninguna condición específica para el material. Únicamente debe cumplir lo exigido al material habitual y que sus características físicoquímicas aseguren la estabilidad futura del conjunto.

Este hecho ha podido dar lugar a una interpretación errónea de que los áridos siderúrgicos no están recogidos en el vigente PG-3, que está provocando en algunos casos la desestimación del uso de este material en proyectos y obras, y a reparos sobre su utilización en las actividades de supervisión de proyectos. Por ello, el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) por medio de la Nota Técnica NT 03/2020<sup>241</sup> aclara dicha interpretación y proporciona algunas directrices técnicas sobre el empleo de áridos siderúrgicos (entre las que se encuentra la escoria negra), en especial en el campo de las mezclas bituminosas donde su utilización como árido en capa de rodadura puede ser una clara alternativa.

Además de esta norma de aplicación general para las obras de carreteras PG-3 y su correspondiente nota técnica, se ha revisado otra normativa de aplicación particular a determinados usos. En concreto, se han revisado las siguientes normas:

- Aplicaciones no ligadas
  - Nota Técnica NT 03/2020
  - Orden FOM para el uso específico de áridos en aplicaciones ferroviarias
- Aplicaciones ligadas
  - Orden Circular OC 3/2019 sobre mezclas bituminosas tipo SMA
  - Nota Técnica NT 03/2020
  - Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)
  - Normativa específica que regula la composición y uso del cemento

En la siguiente tabla se presenta de forma resumida el contenido de aquellos artículos en los que se menciona el posible uso de áridos reciclados y secundarios como material de la construcción alternativo en las diversas aplicaciones contempladas.

---

<sup>240</sup> Orden FOM/1382/2002, de 16 mayo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes relativos a la construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones.

<sup>241</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

**Tabla 8.4-1. Normativa en la que se permite el uso de materiales alternativos en las obras de construcción**

| Aplicación                                 | Normativa/Artículo                        | Material de la construcción  | Materiales alternativos permitidos   |
|--|---|--|--|
| Zahorra                                    | PG-3. Art. 510                            | Material granular, de granulometría continua (una mezcla de árido grueso y árido fino), constituido por partículas total o parcialmente trituradas, en la proporción mínima que se especifique en cada caso y que es utilizada como capa de firme.   | Art. 510. 2.2.1. Para las categorías de tráfico pesado T2 a T4 se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos reciclados de residuos de construcción y demolición —entendiendo por tales a aquellos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción—, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho. |
| Material tratado con cemento: gravacemento | PG-3. Art. 513                            | Mezcla homogénea de material granular, cemento, agua y, eventualmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada, se utiliza como capa estructural en firmes de carretera. Dependiendo del material granular se distinguen dos tipos de materiales tratados con cemento: suelocemento y gravacemento.<br><br>Para el suelocemento se utilizará un suelo granular o material de origen natural, rodado o triturado, o una mezcla de ambos, exento de todo tipo de materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa. En la gravacemento se utilizará un árido natural procedente de la trituración de piedra de cantera o de gravera. | 513.2.3.1. En ambos casos podrán utilizarse subproductos, residuos de construcción y demolición —entendiendo por tales a aquellos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción— o productos inertes de desecho.   |
| Emulsión bituminosa                        | PG-3. Art. 540<br>Nota Técnica NT 03/2020 | Mezclas bituminosas con consistencia adecuada para su puesta en obra directa e inmediata, y que se fabrican a temperatura ambiente mediante emulsión bituminosa, áridos, agua y, eventualmente, polvo mineral de aportación y aditivos   | 540.2.3.1. Los áridos a emplear podrán ser naturales o artificiales siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o el Director de las Obras, podrá exigir especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.                              |
| Mezcla bituminosa                          | PG-3. Art. 542<br>PG-3. Art. 540          | Combinación de un betún asfáltico, áridos con granulometría continua,  | 542.2.3.1. Los áridos podrán ser de origen natural, artificial o reciclado   |

| Aplicación   | Normativa/Artículo  | Material de la construcción  | Materiales alternativos permitidos  |
|--|---|--|---|
| tipo hormigón bituminoso   | Orden Circular OC 3/2019 (Art.544)<br>Nota Técnica NT 03/2020                                     | polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante, cuyo proceso de fabricación a una temperatura muy superior a la del ambiente.   | siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.<br><br>544.2.3.1. Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas tipo SMA podrán ser de origen natural o artificial (como, por ejemplo, las escorias siderúrgicas) siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.   |
| Mezclas bituminosas para capa de rodadura  | PG-3. Art. 543<br>PG-3. Art. 540<br>Orden Circular OC 3/2019 (Art.544)<br>Nota Técnica NT 03/2020 | Combinación de un betún asfáltico, áridos —en granulometría continua con bajas proporciones de árido fino o con discontinuidad granulométrica en algunos tamices—, polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante, a temperatura elevada. | 543.2.3.1 Los áridos a emplear podrán ser naturales o artificiales siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.<br><br>544.2.3.1. Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas tipo SMA podrán ser de origen natural o artificial (como, por ejemplo, las escorias siderúrgicas) siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo |
| Pavimentos de hormigón (para carreteras)   | PG-3. Art. 550  | Conjunto de losas de hormigón en masa separadas por juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado, en ambos casos eventualmente dotados de juntas longitudinales.   | 550.2.4.1 Los áridos cumplirán las prescripciones de la vigente Instrucción de Hormigón Estructural EHE y las adicionales contenidas en este artículo. En la capa inferior de pavimentos bicapa se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho   |
| Hormigón estructural (preparado, prefabricados y cajones para diques portuarios), y no estructural (de limpieza, de relleno) | Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Art. 28.  | Material compuesto empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante al que se añaden partículas de un agregado, agua y aditivos específicos. El hormigón estructural es el utilizado habitualmente en la ejecución de cualquier tipo de estructura, bien sea de obra civil o de edificación.                             | Como áridos para la fabricación de hormigones pueden emplearse áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas), según la norma UNE-EN 12620 <sup>242</sup> , rodados o procedentes de rocas machacadas, <u>así como escorias siderúrgicas enfriadas por aire</u> , en general, cualquier otro tipo de árido cuya evidencia de buen comportamiento haya sido                     |

<sup>242</sup> UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón.

| Aplicación             | Normativa/Artículo   | Material de la construcción   | Materiales alternativos permitidos  |
|------------------------|----------------------|---|---|
|                        |                      |   | sancionado por la práctica y se justifique debidamente.<br><br>En el caso de utilizar áridos siderúrgicos, se comprobará previamente que son estables.  |
| Hormigón magro vibrado | PG-3. Art. 551       | Mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y aditivos, empleada en capas de base bajo pavimento de hormigón, que se pone en obra con una consistencia tal que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación   | 551.2.4.1 Los áridos cumplirán las prescripciones de la vigente Instrucción de Hormigón Estructural EHE y las adicionales contenidas en este artículo. Se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho  |
| Relleno localizado     | PG-3. Art. 332       | Unidad que consiste en la extensión y compactación de suelos, procedentes de excavaciones o préstamos, en relleno de zanjas, trasdós de obras de fábrica, cimentación o apoyo de estribos o cualquier zona que, por reducida de su extensión, compromiso estructural u otra causa no permita la utilización de los mismos equipos de maquinaria con que se lleva a cabo la ejecución del resto de relleno, o bien exija unos cuidados especiales en su construcción | 330.3.2. Además de los suelos naturales, se podrán utilizar en terraplenes los productos procedentes de procesos industriales o de manipulación humana, siempre que cumplan las especificaciones de este artículo y que sus características físico-químicas garanticen la estabilidad presente y futura del conjunto.   |
| Terraplenes            | PG-3. Art. 330       | Esta unidad consiste en la extensión y compactación, por tongadas, de los materiales cuyas características se definen en el apartado 330.3  | 330.3.2 Características de los materiales Los rellenos tipo terraplén estarán constituidos por materiales que cumplan alguna de las dos condiciones granulométricas siguientes (...) según UNE 103101. Además de los suelos naturales, se podrán utilizar en terraplenes los productos procedentes de procesos industriales o de manipulación humana, siempre que cumplan las especificaciones de este artículo y que sus características físico-químicas garanticen la estabilidad presente y futura del conjunto. |
| Explanada              | Orden FOM/3460/2003, | 5.1. Formación de la explanada.   | 5.2. Materiales para la formación de la explanada.  |

| Aplicación | Normativa/Artículo   | Material de la construcción  | Materiales alternativos permitidos   |
|------------|--|--|--|
|            | de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC "Secciones de firme", de la Instrucción de Carreteras. Art. 5. | A los efectos de definir la estructura del firme en cada caso, se establecen tres categorías de explanada, denominadas respectivamente E1, E2 y E3 | <p>Las explanadas construidas con materiales diferentes de los considerados (residuos, subproductos, etc.) serán clasificadas, cuando sea posible, por analogía y, en otro caso, mediante un estudio específico.</p> <p>b) Los materiales han de cumplir las prescripciones contenidas el (PG-3), además de las complementarias recogidas en la tabla 4 de esta norma donde se relacionan los materiales utilizables en la formación de la explanada:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- materiales regulados en el Art. 330 PG-3 (suelo marginal, tolerable, adecuado, seleccionado)</li> <li>- materiales regulados en el Art. 512. Suelo estabilizado in situ con cemento o con cal.</li> </ul> |

En la mayor parte de las aplicaciones reguladas en el PG-3, se exige que los áridos o materiales empleados **dispongan del marcado CE con un sistema de evaluación de la conformidad 2+ (aspecto remarcado en la reciente nota técnica)**, salvo en el caso de los áridos fabricados en el propio lugar de construcción para su incorporación en la correspondiente obra (artículo 5.b del Reglamento 305/2011).

#### 8.4.1 Uso como árido en aplicaciones no ligadas

##### ○ Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para las Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)

Los requisitos que deben cumplir los materiales para firmes de carreteras se desarrollan en este pliego en diferentes artículos dependiendo de la aplicación concreta.

Todos sus artículos dejan abierto el uso posible del árido siderúrgico en distintos casos, siempre que cumpla los requisitos técnicos, pero 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. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá fijar especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear materiales cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.

- *Artículo 330. Terraplenes. Características materiales.*

*Además de los suelos naturales, se podrán utilizar en terraplenes los productos procedentes de procesos industriales o de manipulación humana, siempre que cumplan las especificaciones de este*

*artículo y que sus características fisicoquímicas garanticen la estabilidad presente y futura del conjunto. En todo caso se estará a lo dispuesto en la legislación vigente en materia medioambiental, de seguridad y salud, y de almacenamiento y transporte de productos de construcción.*

- *Artículo 332. Rellenos localizados. Materiales.*

*Se utilizarán solamente suelos adecuados y seleccionados según el apartado 330 de este Pliego.*

- *Artículo 510. Zahorras.*

*Se define zahorra como material granular, de granulometría continua, constituido por partículas total o parcialmente trituradas, en la proporción mínima que se especifique para cada caso y que es utilizado para capa de firme.*

*Para las categorías de tráfico pesado, se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos reciclados de residuos de construcción y demolición, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en este artículo, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria.*

*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. El Pliego deberá fijar los ensayos para determinar la inalterabilidad del material granular.*

*Los áridos siderúrgicos, tras un proceso previo de machaqueo, cribado y eliminación de elementos metálicos y otros contaminantes, se envejecerán con riego de agua durante un periodo mínimo de tres (3) meses.*

*Los materiales para las capas de zahorra no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración fisicoquímica apreciable bajo las condiciones más desfavorables que puedan darse en la zona de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras u otras capas de firme, o contaminar corrientes de agua.*

*El árido siderúrgico de acería deberá presentar una expansividad inferior al 5% (norma UNE-EN 1744-1). El Índice Granulométrico de Envejecimiento (IGE) (NLT-361) será inferior al 1% y el contenido de cal libre (UNE-EN 1744-1) será inferior al 5‰.*

*El Coeficiente de los Ángeles para áridos siderúrgicos deberá ser inferior a 35 para categoría de tráfico pesado (T00 a T2) y 40 para T3, T4 y arcenes, siempre que su composición granulométrica se adapte al uso ZAD20 que figura en el pliego (tipo denominado zahorra drenante). La designación del tipo de zahorra se hace en función del tamaño máximo nominal, que se define como la abertura del primer tamiz que retiene más de un diez por ciento en masa.*

*Art. 510.9. Control de calidad. Los áridos naturales, artificiales o procedentes de reciclado, deberán tener marcado CE, según el anejo ZA de la norma UNE-EN 13242. En el caso de áridos con marcado CE, el control de procedencia se podrá llevar a cabo mediante la verificación documental de que los valores declarados en los documentos que acompañan a dicho marcado permiten deducir el cumplimiento de las especificaciones establecidas en este Pliego.*

- **Nota Técnica del MITMA NT 03/2020<sup>243</sup>**

Esta Nota Técnica aclara la interpretación sobre el uso de áridos siderúrgicos, entre los que se encuentran las escorias negras, y proporciona algunas directrices técnicas sobre el empleo de este material, en especial en el campo de las mezclas bituminosas, pero también en ciertas aplicaciones no ligadas en la construcción de carreteras.

Concretamente, la Nota Técnica apunta que a pesar de lo indicado en el *artículo 510. Ahorras* del PG-3, en relación con el periodo mínimo de envejecimiento con agua de tres meses, se ha observado que este aspecto no es relevante y que el periodo necesario vendrá establecido por los resultados de los ensayos de expansión. En la mayoría de los casos, el aspecto más relevante para reducir este tipo de fenómenos expansivos es el procedimiento de enfriamiento utilizado.

Se indica también que está expresamente prohibida la mezcla de escorias negras y blancas para su empleo como material granular en cualquiera de los elementos que constituyen la estructura de un firme de carreteras. La detección de la presencia de escoria blanca en cualquier lote suministrado a la obra debe suponer el rechazo de todo el material de la misma procedencia, así como del suministrador de este material.

Por último, para cualquiera de los posibles empleos contemplados en el PG-3 es preceptivo que el árido siderúrgico esté en posesión del marcado CE correspondiente. De esta forma, se tiene una garantía de que no se está empleando un residuo cualquiera, sino un material que ha sido objeto de un procesamiento completo (machaqueo, clasificación, envejecimiento, caracterización...), para obtener un material/producto apto para su empleo en obras de carretera.

- **Orden FOM/1269/2006, de 17 de abril, por la que se aprueban los Capítulos: 6.-Balasto y 7.- Subbalasto del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios (PF)**

Pese a que formalmente esta norma no menciona el posible uso de materiales reciclados, se ha incluido en este análisis al regular las condiciones de uso de uno de los áridos que pretende sustituir la escoria de acero: el sub-balasto que, además, también se permite en las tres normas de valorización de escorias existentes en España y, a nivel europeo, en Alemania.

Esta norma define las características técnicas del balasto a utilizar como capa soporte de vías férreas, así como los controles de calidad a los que debe ser sometido previamente a su puesta en obra.

Los áridos para balasto deberán estar en posesión del marcado CE. Por ello, deberán disponer del correspondiente certificado de control de producción y declaración de conformidad «CE», expedido por un organismo notificado, conforme con los términos establecidos en el Anejo ZA de la UNE-EN 13450:2003<sup>244</sup>.

---

<sup>243</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

<sup>244</sup> UNE -EN 13450:2003. Áridos para balasto.

El balasto deberá proceder de:

- Extracción de rocas de cantera, seguida de machaqueo, cribado y clasificación, con o sin posterior tratamiento industrial que implique una modificación térmica o de otro tipo.
- Reutilización de balasto procedente de obras ferroviarias. En este caso se comprobará, según la norma UNE-EN 933-5:1999, que el 100% de las partículas retenidas por el tamiz 22,4 son de las denominadas «totalmente trituradas».

El balasto no podrá contener fragmentos de: madera, materia orgánica, metales, plásticos, rocas alterables, ni de materiales tixotrópicos, expansivos, solubles, putrescibles, combustibles ni polucionantes (desechos industriales).

El sub-balasto por su parte tendrá su origen en:

- Extracción en cantera, desmontes o préstamos de materiales rocosos, seguida de machaqueo, cribado y clasificación.
- Reutilización de materiales de naturaleza rocosa procedentes de obras civiles.

El sub-balasto no podrá contener fragmentos de: madera, materia orgánica, metales, plásticos, rocas alterables, ni de materiales tixotrópicos, expansivos, solubles, putrescibles, combustibles ni polucionantes (desechos industriales).

#### 8.4.2 Uso como árido en aplicaciones ligadas

- o **Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para las Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)**

Los requisitos que deben cumplir los materiales para firmes de carreteras cuando se utilizan de forma ligada se desarrollan en este pliego en diferentes artículos dependiendo la aplicación concreta.

- *Artículo 513. Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento)*

*Se define como material tratado con cemento la mezcla homogénea, en las propiedades adecuadas, de material granular, cemento, agua y, eventualmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada se utiliza como capa estructural en firmes de carretera. Dependiendo del material granular utilizado se distinguen dos tipos de materiales tratados con cemento: suelocemento y gravacemento.*

*En ambos casos podrán utilizarse subproductos, residuos de construcción y demolición o productos inertes de desecho [...], siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en este artículo, y se declare el origen de los materiales, tal y como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias.*

- *Artículo 540. Microaglomerados en frío*

*Se definen como microaglomerados en frío aquellas mezclas bituminosas con consistencia adecuada para su puesta en obra directa e inmediata, y que se fabrican a temperatura ambiente mediante emulsión bituminosa, áridos, agua y, eventualmente, polvo mineral de aportación y aditivos.*



*Los áridos a emplear podrán ser naturales o artificiales siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.*

- *Artículo 542. Mezcla bituminosa en caliente tipo hormigón bituminoso*

*Se define como mezcla bituminosa tipo hormigón bituminoso la combinación de un betún asfáltico, áridos con granulometría continua, polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante, cuyo proceso de fabricación y puesta en obra deben realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente.*

*Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas podrán ser de origen natural, artificial o reciclado siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.*

- *Artículo 543. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas*

*Se definen como mezclas bituminosas para capa de rodadura aquellas resultantes de la combinación de un betún asfáltico, áridos —en granulometría continua con bajas proporciones de árido fino o con discontinuidad granulométrica en algunos tamices—, polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante, cuyo proceso de fabricación y puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente.*

*Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas discontinuas y en las drenantes podrán ser naturales o artificiales siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.*

- *Artículo 550. Pavimentos de hormigón*

*Se define como pavimento de hormigón el constituido por un conjunto de losas de hormigón en masa separadas por juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado, en ambos casos eventualmente dotados de juntas longitudinales.*

*Los áridos cumplirán las prescripciones de la vigente Instrucción de Hormigón Estructural EHE y las adicionales contenidas en este artículo.*

*En la capa inferior de pavimentos bicapa se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho [...], siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en este artículo, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias.*

- *Artículo 550. Hormigón magro vibrado*

*Se define como hormigón magro vibrado la mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y aditivos, empleada en capas de base bajo pavimento de hormigón.*

*Los áridos cumplirán las prescripciones de la vigente Instrucción de Hormigón Estructural EHE y las adicionales contenidas en este artículo.*

*Se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho [...], siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en este artículo, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas*

○ **Orden Circular OC 3/2019 sobre mezclas bituminosas tipo SMA<sup>245</sup>**

Esta orden regula la utilización de mezclas bituminosas tipo SMA, tipología no contemplada actualmente en el PG-3, cuya mayor durabilidad y buen comportamiento frente a la reflexión de fisuras conduce a que deban ser tenidas en cuenta para su empleo.

Se define como mezcla bituminosa tipo SMA la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos —con bajas proporciones de árido fino y discontinuidad granulométrica en los tamaños intermedios del árido grueso—, polvo mineral y aditivo estabilizante, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una gruesa película homogénea de ligante, cuyo proceso de fabricación y puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente.

Entre las características generales de los áridos a emplear el artículo 544.2.3.1 indica:

*Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas tipo SMA podrán ser de origen natural o artificial (como, por ejemplo, las escorias siderúrgicas) siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.*

*Los áridos no serán susceptibles a ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en la zona de empleo. Se debe garantizar tanto la durabilidad a largo plazo, como que no puedan dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras o a otras capas del firme, o contaminar corrientes de agua superficiales o subterráneas. 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 empleados.*

○ **Nota Técnica del MITMA NT 03/2020<sup>246</sup>**

Adicionalmente a lo indicado anteriormente en el apartado 8.3.1, esta Nota Técnica proporciona directrices técnicas sobre el empleo de áridos siderúrgicos especialmente en el campo de las mezclas bituminosas, donde su utilización como árido en capa de rodadura puede ser una clara alternativa.

Según la Nota Técnica la experiencia acumulada ha permitido acreditar un excelente comportamiento del árido siderúrgico y la ausencia de problemas de durabilidad. En particular, las mezclas bituminosas para capas de rodadura elaboradas con este tipo de árido artificial ofrecen superficies con elevados niveles de

---

<sup>245</sup> Dirección General de Carreteras. Orden Circular OC 3/2019 sobre mezclas bituminosas tipo SMA. Diciembre 2019.

<sup>246</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

adherencia. Se diseñan del mismo modo que el resto de las mezclas y no presentan problemas para cumplir las especificaciones.

La Nota Técnica señala que las escorias negras, adecuadamente tratadas, cumplen generalmente las especificaciones técnicas que exigen los pliegos de carreteras para áridos de capas granulares en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras. Presentan un riesgo latente de expansión y de hinchamiento, por lo que resulta muy importante evaluar su potencial expansivo y limitar su uso cuando se sobrepasen los valores establecidos. También señala que no deben utilizarse nunca en capas estabilizadas con cemento o junto a obras de fábrica u otros elementos que restrinjan las posibles expansiones

Debido a su porosidad, su angulosidad, y a la falta de finos, las escorias pueden resultar incómodas de extender y compactar, por lo que suelen combinarse con otros áridos para mejorar estos aspectos.

Las escorias negras son las de mayor dureza, densidad, resistencia a la abrasión y desgaste, lo que las hace muy adecuadas para su uso en la fabricación de mezclas bituminosas, compensando las desventajas de su mayor densidad ( $3,3 \text{ t/m}^3$  -  $3,7 \text{ t/m}^3$ ). La absorción de agua de la escoria negra suele estar comprendida entre 1% - 4% en volumen. Las partículas son duras, con coeficientes de desgaste Los Ángeles entre 15% - 25%, y con un coeficiente de pulimento acelerado (PSV) comprendido entre 0,50 y 0,60 lo que las hace aptas para mezclas bituminosas en capas de rodadura.

Debido a la presencia de óxidos de cal y magnesio libres en su composición, las escorias negras de acería tienen naturaleza expansiva que en cualquier caso requieren de un proceso de enfriamiento y tratamiento adecuado para garantizar su estabilidad.

Para cualquiera de los posibles empleos contemplados en el PG-3, la Nota Técnica señala que es preceptivo que el árido siderúrgico esté en posesión del marcado CE correspondiente. De esta forma, se tiene una garantía de que no se está empleando un residuo cualquiera, sino un material que ha sido objeto de un procesamiento completo (machaqueo, clasificación, envejecimiento, caracterización...), para obtener un material/producto apto para su empleo en obras de carretera.

En la fabricación de mezclas con estos áridos se plantea el problema de la falta de finos en la fracción más pequeña. Una dosificación de áridos adecuada, desde un punto de vista técnico, es la que combina árido grueso siderúrgico y árido fino calizo.

Dada la importante diferencia de densidades entre el árido natural y el árido siderúrgico es imprescindible que la composición granulométrica se determine de forma volumétrica y nunca de forma ponderal. Una vez obtenida la curva de trabajo mediante las composiciones granulométricas habituales, las proporciones volumétricas calculadas pueden convertirse en ponderales utilizando como factor de corrección la densidad aparente de partículas de cada fracción de árido y polvo mineral.

A causa de su origen y de los procesos de enfriamiento a que son sometidas las escorias siderúrgicas, la variabilidad de algunas propiedades del árido siderúrgico, como la densidad (norma UNE-EN 1097-6) y también la absorción (norma UNE-EN 1097-6), es superior a la que presentan los áridos naturales. Debe

comprobarse que esta variabilidad no afecta al comportamiento de la mezcla o, en caso contrario, adoptar medidas para reducir los rangos de variación encontrados y/o ajustar los parámetros de diseño.

El contenido de humedad del árido siderúrgico suele ser superior al del árido natural, por esta razón, es importante cuidar que desde la instalación de tratamiento hasta la central de fabricación se transporten los áridos lo más secos posible. Una vez allí es conveniente que se acopien sobre superficies pavimentadas y con pendientes adecuadas para facilitar la evacuación del agua.

Siempre que sea posible, es recomendable apartar las fracciones con humedad excesiva (> 5%), reservándolas hasta que su secado a la intemperie reduzca su contenido de agua tanto como sea posible, para no incrementar la demanda energética de la central de fabricación y para prevenir la existencia de humedad residual en la mezcla bituminosa.

Las aplicaciones en las que puede resultar más beneficioso el uso de árido siderúrgico en mezclas bituminosas son capas de rodadura en vías de alta intensidad de tráfico, capas intermedias más rígidas, mezclas bituminosas sono-reductoras y reparaciones.

Desde el punto de vista medioambiental, se señala que es preciso comprobar que los resultados del ensayo de lixiviación sobre las escorias permanezcan por debajo de los límites fijados. Los lixiviados de las escorias, en especial de aquellas que no hayan sido envejecidas, pueden presentar problemas debido fundamentalmente a los altos valores de pH y a la presencia de cantidades significativas de metales pesados.

La Nota Técnica incluye asimismo una propuesta sobre cómo recoger de una forma más detallada el empleo de árido siderúrgico en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares de diversos tipos de mezclas bituminosas. En la siguiente tabla se recogen los principales requisitos adicionales propuestos al contenido vigente del PG-3 y de la Orden Circular 3/2019:

**Tabla 8.3.2-1. Nota Técnica NT 03/2020. Requisitos adicionales propuestos.**

| Aplicación  | Aspecto                   | Requisitos adicionales   |
|---|---------------------------|--|
| 1. Microaglomerados en frío   |                           | El árido siderúrgico, de cualquier procedencia, deberá cumplir los siguientes requisitos adicionales:  |
| 2. Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso (AC)  | Características generales | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Expansividad &lt; 3,5% en volumen (UNE-EN 13043<sup>247</sup>).</li> <li>• Variación densidad aparente (norma UNE-EN 1097-6), respecto a su valor declarado o utilizado en el diseño de mezclas, obtenida en cualquiera de los ensayos de control de calidad de los materiales será &lt;10% y la de la mezcla de áridos será &lt;7,5%.</li> </ul> |
| 3. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes (PA) y discontinuas (BBTM) |                           |  |
| 4. Mezclas Bituminosas Tipo SMA   | Angulosidad               | Se considerará que la proporción de partículas totalmente trituradas es del 100% independientemente de que hayan sido obtenidas por clasificación y trituración o únicamente por clasificación de la escoria siderúrgica.  |

<sup>247</sup> UNE-EN 13043:2003 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.

| Aplicación  | Aspecto  | Requisitos adicionales  |
|---|--|---|
| 1. Microaglomerados en frío   | Tipo, composición y dotación de microaglomerado  | <p>Cuando se combinen fracciones de árido cuyas densidades aparentes difieran entre sí más de 0,15 g/cm<sup>3</sup> las proporciones cernidas por cada tamiz indicadas en la Tabla 540.7 como % en masa, deben tomarse como % en volumen.</p> <p>Las dotaciones indicadas deberán adecuarse a la densidad del conjunto de áridos combinados. Se puede tomar como referencia que la utilización de árido siderúrgico en microaglomerados en frío como árido grueso, supone un incremento de las dotaciones medias del orden de un 12% para el MICROF 11, del 10% para el MICROF 8, y del 5-6% para el MICROF 5.</p>  |
|   | Tipo y composición de la mezcla                  | <p>Cuando se combinen fracciones de árido cuyas densidades aparentes difieran entre sí más de 0,15 g/cm<sup>3</sup> las proporciones cernidas por cada tamiz indicadas en la Tabla 540.7 como % en masa, deben tomarse como % en volumen.</p> <p>En el caso de que la densidad del polvo mineral total suma del procedente de los áridos y el de aportación (norma UNE-EN 1097-7), sea diferente de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, las relaciones ponderales recomendables de la tabla 542.10, así como las indicadas para mezclas de alto módulo, se deberán corregir multiplicando por el factor <math>\beta = \rho d / 2,65</math>, donde <math>\rho d</math> es la densidad del polvo mineral total.</p>  |
| 2. Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso (AC)  | Ejecución de la obra. Principios generales       | En categorías de tráfico pesado T00 a T2, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir un estudio de sensibilidad de las propiedades de la mezcla a variaciones de densidad de los áridos, granulometría y dosificación de ligante hidrocarbonado que no excedan de las admitidas en los epígrafes 542.2.3.1 y 542.9.3.1.  |
|   | Ejecución de la obra. Control de calidad. Áridos | Cuando se utilicen áridos siderúrgicos, se solicitará al proveedor la densidad relativa (norma UNE-EN 1097-6) y la absorción (norma UNE-EN 1097-6) de cada fracción suministrada, así como de los resultados de estabilidad de volumen (apartado 4.3.4 de la norma UNE-EN 13043).   |
|   | Ejecución de la obra. Fabricación                | Se determinará el contenido de agua (norma UNE-EN 12697-28) en el caso en que la humedad de los áridos, su naturaleza o la temperatura de fabricación puedan dar lugar a la presencia de humedad residual, como ocurre por ejemplo con el árido siderúrgico.  |
|   | Ejecución de la obra. Extensión                  | Sobre algunas de estas muestras, se podrán llevar a cabo, además, a juicio del Director de las Obras, ensayos de comprobación de la dosificación de ligante (norma UNE-EN 12697-1), de la granulometría de los áridos extraídos (norma UNE-EN 12697-2) y de contenido de agua (norma UNE EN 12697-28).  |
| 3. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes (PA) y discontinuas (BBTM) | Tipo y composición de la mezcla                  | <p>Cuando se combinen fracciones de árido cuyas densidades aparentes difieran entre sí más de 0,15 g/cm<sup>3</sup> las proporciones cernidas por cada tamiz indicadas en la Tabla 540.7 como % en masa, deben tomarse como % en volumen.</p> <p>Se puede tomar como referencia que la utilización de árido siderúrgico como árido grueso, supone un incremento de las dotaciones medias del orden de un 20% para mezclas porosas (PA) y del 25% para mezclas discontinuas (BBTM).</p> <p>En el caso de que la densidad del polvo mineral total suma del procedente de los áridos y el de aportación (norma UNE-EN 1097-7), sea diferente de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, las relaciones ponderales indicadas se deberán corregir multiplicando por el factor <math>\beta = \rho d / 2,65</math>, donde <math>\rho d</math> es la densidad del polvo mineral total.</p> |
|   | Ejecución de la obra. Principios generales       | En el caso de categorías de tráfico pesado T00 a T2, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir un estudio de sensibilidad de las propiedades de la mezcla a variaciones de densidad de los áridos, granulometría y dosificación de ligante hidrocarbonado que no excedan de las admitidas en los epígrafes 543.2.3 y 543.9.2.2.   |

| Aplicación                         | Aspecto  | Requisitos adicionales  |
|------------------------------------|--|---|
| 4. Mezclas Bituminosas<br>Tipo SMA | Ejecución de la obra. Control de calidad. Áridos | Similares a mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso (AC)   |
|                                    | Ejecución de la obra. Fabricación                |   |
|                                    | Ejecución de la obra. Extensión                  |   |
|                                    | Tipo y composición de la mezcla                  | Similares a mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso (AC)   |
|                                    | Ejecución de la obra. Principios generales       | En el caso de categorías de tráfico pesado T00 a T2, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir un estudio de sensibilidad de las propiedades de la mezcla a variaciones de densidad de los áridos, granulometría y dosificación de ligante hidrocarbonado que no excedan de las admitidas en los epígrafes 544.2.3 y 544.9.2.2. |
|                                    | Ejecución de la obra. Control de calidad. Áridos | Cuando se utilicen áridos siderúrgicos, se solicitará al proveedor que facilite información sobre la densidad relativa (norma UNE-EN 1097-6) y la absorción (norma UNE-EN 1097-6) de cada fracción suministrada.  |
|                                    | Ejecución de la obra. Fabricación                | Similares a mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso (AC)   |
|                                    | Ejecución de la obra. Extensión                  | Al menos en un 20 % de los lotes se tomarán muestras de la dosificación de ligante (norma UNE-EN12697-1), de la granulometría de los áridos extraídos (norma UNE-EN 12697-2) y de contenido de agua (norma UNE EN 12697-28).  |

- **Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)**

Esta *Instrucción de Hormigón Estructural, EHE*, es el marco reglamentario por el que se establecen las exigencias que deben cumplir las estructuras de hormigón para satisfacer los requisitos de seguridad estructural y seguridad en caso de incendio, además de la protección del medio ambiente, proporcionando procedimientos que permiten demostrar su cumplimiento con suficientes garantías técnicas, tanto en obras de edificación como de ingeniería civil.

Los materiales y los productos de construcción que se incorporen con carácter permanente a las estructuras (hormigón, cemento, áridos, acero corrugado, armaduras elaboradas, sistemas de pretensado, elementos prefabricados, etc.) deberán presentar las características suficientes para que la estructura cumpla las exigencias de la instrucción, para lo que deberá comprobarse su conformidad de acuerdo con los criterios establecidos.

En el *Capítulo VI. Materiales* de esta instrucción, se definen los materiales que se emplean para la fabricación de hormigón, *permitiendo la utilización de productos de construcción que estén fabricados o comercializados legalmente en los Estados miembros de la Unión Europea y en los Estados firmantes del Acuerdo sobre el Espacio Económico Europeo, y siempre que dichos productos, cumpliendo la normativa de cualquier Estado*

*miembro de la Unión Europea, aseguren en cuanto a la seguridad y el uso al que están destinados un nivel equivalente al que exige la instrucción.*

En el artículo 28, se establecen las características que deben tener los áridos. Se señala que *como áridos para la fabricación de hormigones pueden emplearse áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas), según la norma UNE-EN 12620<sup>248</sup>, rodados o procedentes de rocas machacadas, así como escorias siderúrgicas enfriadas por aire, en general, cualquier otro tipo de árido cuya evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica y se justifique debidamente.*

En el caso de utilizar áridos siderúrgicos (como, por ejemplo, escorias siderúrgicas granuladas de alto horno), se comprobará previamente que son estables, es decir, que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos inestables. Dada su peligrosidad, sólo se permite el empleo de áridos con una proporción muy baja de sulfuros oxidables. En el caso de las escorias de alto horno, se establece un contenido máximo en sulfatos solubles en ácido, del 1 %, un contenido máximo de compuestos totales de azufre del 2 %, así como requisitos de estabilidad frente a fenómenos de transformación del silicato bicálcico o la hidrólisis de sulfuros de Fe y Mn.

En el artículo 85.2 del *Capítulo XVI. Control de la conformidad de los productos*, se señala que *los áridos deberán disponer del marcado CE con un sistema de evaluación de la conformidad 2+, por lo que su idoneidad se comprobará mediante la verificación documental de que los valores declarados en los documentos que acompañan al citado marcado CE permiten deducir el cumplimiento de las especificaciones contempladas en el proyecto y en el artículo 28º de la Instrucción*, excepto en el caso de áridos de autoconsumo.

- ***Real Decreto 163/2019, de 22 de marzo, por el que se aprueba la Instrucción Técnica para la realización del control de producción de los hormigones fabricados en central***

Esta instrucción tiene por objeto establecer los criterios técnicos para la realización del control de producción de los hormigones fabricados en central y deroga la *Orden de 21 de noviembre de 2001, por la que se establecen los criterios para la realización del control de producción de los hormigones fabricados en central.*

Cada uno de los materiales componentes empleados para la fabricación del hormigón deberá suministrarse a la central de hormigón acompañado de la documentación de suministro indicada en la reglamentación vigente. En el caso de los áridos, excepto en el caso de los áridos fabricados en el propio lugar de construcción para su incorporación en la correspondiente obra, deberán disponer de la documentación acreditativa del marcado CE por un sistema de evaluación y verificación de la constancia de las prestaciones 2+, según el *Reglamento (UE) n.º 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011*, y la norma *UNE-EN 12620+A1: 2009. Áridos para hormigón.*

En cuanto a las materias primas en el hormigón se contempla la posibilidad de utilizar áridos siderúrgicos, como, por ejemplo, escorias de horno alto enfriadas por aire, documentando que disponen del

---

<sup>248</sup> *UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón.*

correspondiente marcado CE y que cumplen los requisitos exigibles a los áridos contemplados en el artículo 28 de la Instrucción EHE-08.

La central de hormigón llevará un archivo de todos los documentos y registros relativos al control de producción que comprenderá, al menos: a) registro por separado de las garantías documentales o ensayos realizados para cada uno de los materiales componentes del hormigón (cemento, áridos, aditivos, adiciones, agua), b) registro del control de las instalaciones y medios de transporte, c) registro de los resultados de ensayo del control del hormigón, d) registro de certificados de garantía final de suministro, e) archivo y registro de documentación relativa al laboratorio de control de producción y sus registros de resultado.

Así mismo debe existir un registro de dosificaciones del hormigón en el que se reflejen el cliente y obra, la fecha de fabricación, la designación según la *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)*, la procedencia y tipo del cemento, de los áridos, de las adiciones y de los aditivos, entre otros.

#### 8.4.3 Uso como materia prima en la fabricación de productos de construcción

- ***Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16)***

Tiene por objeto establecer las prescripciones técnicas generales que deben satisfacer los cementos, así como regular su recepción con el fin de que los productos de construcción en cuya composición se incluya cemento permitan que las obras de construcción en que se empleen satisfagan los requisitos esenciales exigibles.

Su ámbito de aplicación se extiende a la recepción de cementos en las obras de construcción, en las centrales de fabricación de hormigón y en cualesquiera otras instalaciones, como en aquellas en las que se fabriquen productos de construcción en los que en su composición se emplee cemento.

Los tipos de cementos incluidos en esta instrucción, así como su correspondiente composición, son los que figuran en su Anejo I, para los cementos sujetos al marcado CE, y en su Anejo II, para los cementos sujetos al *Real Decreto 1313/1988, de 28 de octubre*<sup>249</sup>, derogado por la *Orden PRE/3796/2006, de 11 de diciembre*<sup>250</sup>, que son todos aquéllos que presentan características adicionales de resistencia a los sulfatos, resistencia al agua de mar o blanca, así como aquéllos con características especiales, cuyas características no están definidas por ninguna norma europea armonizada.

En cuanto a los cementos sujetos a marcado CE, se consideran aquellos cementos comunes definidos en la norma *UNE-EN 197-1:2011* norma que se analiza seguidamente.

---

<sup>249</sup> *Real Decreto 1313/1988, de 28 de octubre, por el que se declara obligatoria la homologación de los cementos para la fabricación de hormigones y morteros para todo tipo de obras y productos prefabricados.*

<sup>250</sup> *Orden PRE/3796/2006, de 11 de diciembre, por la que se modifican las referencias a normas UNE que figuran en el anexo al Real Decreto 1313/1988, de 28 de octubre.*



- **Norma UNE-EN 197-1:2011<sup>251</sup>**

La especificación del cemento está regulada por la norma *UNE-EN 197-1: 2011* que establece la composición, especificaciones y criterios de conformidad para los cementos comunes comerciales.

La norma establece cinco tipos de cemento, se regula el contenido de clínker, así como de su composición y el tipo y proporción de adiciones permitidas. El origen de las materias primas puede ser natural o alternativo.

Como componentes adicionales en la fabricación de cemento, la norma permite los siguientes: escoria de alto horno, humo de sílice, puzolanas naturales, ceniza volante silíceo y calcárea, esquisto calcinado y caliza. De hecho, se dispone de una norma específica que regula el uso de la escoria de alto horno en cementos y hormigones, que es la norma *UNE-EN 15167-1:2008. Escorias granuladas molidas de horno alto para su uso en hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.*

En la siguiente imagen se indican los tipos de cementos existentes en base a la norma *UNE-EN 197-2011*:

---

<sup>251</sup> *UNE-EN 197-1: 2011: Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.*

**Imagen 8.4.3-1. Tipos de cementos. UNE-EN 197.**

| Tipos     | Denominación                              | Designación                   | Composición (proporción en masa <sup>1)5)</sup> |                         |                                |                     |       |                  |       |                        |                      |       | Componentes minoritarios |     |
|-----------|---|-------------------------------|---|-------------------------|--------------------------------|---------------------|-------|------------------|-------|------------------------|----------------------|-------|--------------------------|-----|
|           |   |                               | Componentes principales                         |                         |                                |                     |       |                  |       |                        |                      |       |                          |     |
|           |   |                               | Clinker K                                       | Escoria de horno alto S | Humo de sílice D <sup>2)</sup> | Puzolana            |       | Cenizas volantes |       | Esquistos calcinados T | Caliza <sup>4)</sup> |       |                          |     |
| Natural P | Natural calcinada Q                       | Silíceas V                    |   |                         |                                | calcáreas W         | L     | LL               |       |                        |                      |       |                          |     |
| CEM I     | Cemento pórtland                          | CEM I                         | 95-100  | -                       | -                              | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
| CEM II    | Cemento pórtland con escoria              | CEM II/A-S                    | 80-94   | 6-20                    | -                              | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           |   | CEM II/B-S                    | 65-79   | 21-35                   | -                              | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           | Cemento pórtland con humo de sílice       | CEM II/A-D                    | 90-94   | -                       | 6-10                           | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           |   | Cemento pórtland con puzolana | CEM II/A-P                                      | 80-94                   | -                              | -                   | 6-20  | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | -   |
|           | CEM II/B-P                                |                               | 65-79   | -                       | -                              | 21-35               | -     | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           | CEM II/A-Q                                |                               | 80-94   | -                       | -                              | -                   | 6-20  | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           | CEM II/B-Q                                |                               | 65-79   | -                       | -                              | -                   | 21-35 | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           | Cemento pórtland con ceniza volante       | CEM II/A-V                    | 80-94   | -                       | -                              | -                   | -     | 6-20             | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           |   | CEM II/B-V                    | 65-79   | -                       | -                              | -                   | -     | 21-35            | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           |   | CEM II/A-W                    | 80-94   | -                       | -                              | -                   | -     | -                | 6-20  | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           |   | CEM II/B-W                    | 65-79   | -                       | -                              | -                   | -     | -                | 21-35 | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           | Cemento pórtland con esquistos calcinados | CEM II/A-T                    | 80-94   | -                       | -                              | -                   | -     | -                | -     | 6-20                   | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           |   | CEM II/B-T                    | 65-79   | -                       | -                              | -                   | -     | -                | -     | 21-35                  | -                    | -     | -                        | 0-5 |
|           | Cemento pórtland con caliza               | CEM II/A-L                    | 80-94   | -                       | -                              | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | 6-20  | -                        | 0-5 |
|           |   | CEM II/B-L                    | 65-79   | -                       | -                              | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | 21-35 | -                        | 0-5 |
|           |   | CEM II/A-LL                   | 80-94   | -                       | -                              | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | -     | 6-20                     | 0-5 |
|           |   | CEM II/B-LL                   | 65-79   | -                       | -                              | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | -     | 21-35                    | 0-5 |
|           | Cemento pórtland compuesto <sup>3)</sup>  | CEM II/A-M                    | 80-88   | 12-20                   |                                |                     |       |                  |       |                        |                      |       |                          | 0-5 |
|           |   | CEM II/B-M                    | 65-79   | ←----- 21-35 -----→     |                                |                     |       |                  |       |                        |                      |       |                          | 0-5 |
|           | CEM III                                   | Cemento de horno alto         | CEM III/A                                       | 35-64                   | 36-65                          | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | -   |
| CEM III/B |   |                               | 20-34   | 66-80                   | -                              | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
| CEM III/C |   |                               | 5-19  | 81-95                   | -                              | -                   | -     | -                | -     | -                      | -                    | -     | -                        | 0-5 |
| CEM IV    | Cemento puzolánico <sup>3)</sup>          | CEM IV/A                      | 65-89   | -                       | ←----- 11-35 -----→            |                     |       |                  |       |                        | -                    | -     | 0-5                      |     |
|           |   | CEM IV/B                      | 45-64   | -                       | ←----- 36-55 -----→            |                     |       |                  |       |                        | -                    | -     | 0-5                      |     |
| CEM V     | Cemento compuesto <sup>3)</sup>           | CEM V/A                       | 40-64   | 18-30                   | -                              | ←----- 18-30 -----→ |       |                  | -     | -                      | -                    | -     | 0-5                      |     |
|           |   | CEM V/B                       | 20-38   | 31-49                   | -                              | ←----- 31-49 -----→ |       |                  | -     | -                      | -                    | -     | 0-5                      |     |

La norma *UNE 80-302-85: Cementos*, incluía en un apartado denominado "Otras puzolanas artificiales", las escorias de la metalurgia del cobre, cinc y plomo y las ferroaleaciones, siempre y cuando su contenido de sílice reactiva fuese mayor que 25%, cumplieran con el ensayo de puzolanidad y no contuvieran sustancias nocivas. Sin embargo, en la actualización del año 96 desaparecieron todas las puzolanas artificiales, excepto las cenizas volantes y el humo de sílice.

○ **Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio**<sup>252</sup>

La Directiva 2003/53/CE<sup>253</sup> considera demostrado mediante estudios científicos que los preparados de cemento que contienen cromo (VI) pueden causar reacciones alérgicas en determinadas circunstancias cuando la piel humana está en contacto directo y prolongado con ellos. Considera también que todos los usos del cemento conllevan la posibilidad de un contacto directo y prolongado con la piel humana, con la excepción de los procesos controlados cerrados y totalmente automatizados.

El Comité Científico de Toxicología, Ecotoxicología y Medio Ambiente (CCTEMA) ha confirmado los efectos nocivos que tiene para la salud el cromo (VI) contenido en el cemento. Por ello, debe limitarse la puesta en el mercado y el uso de cemento y preparados de cemento que contengan más de 2 ppm de cromo (VI) en el caso de aquellas actividades en las que existe la posibilidad de contacto con la piel.

En base a estos antecedentes y con el fin de proteger la salud humana, la *Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio*, limita el contenido de cromo (VI) del siguiente modo:

- El cemento y los preparados que contienen cemento no se pueden usar o poner en el mercado si, una vez hidratados, su contenido de cromo (VI) soluble es superior al 0,0002 % del peso seco de cemento. Este requisito se exige a todos los cementos, ensacados y expedidos a granel, que se puedan comercializar legalmente y que estén sometidos al ámbito de la Instrucción RC-16.
- Cuando se usen agentes reductores y sin perjuicio de la aplicación de otras disposiciones comunitarias sobre clasificación, envasado y etiquetado de sustancias y preparados peligrosos, el envase del cemento o de los preparados que contienen cemento deberá ir marcado de forma legible e indeleble con información sobre la fecha de envasado, así como sobre las condiciones de almacenamiento y el tiempo de almacenamiento adecuados para mantener la actividad del agente reductor y el contenido de cromo (VI) soluble por debajo del límite indicado en el punto 1.

A título de excepción, los puntos anteriores no se aplicarán a la puesta en el mercado y el uso en procesos controlados, cerrados y totalmente automatizados en los que el cemento y los preparados que contienen cemento sólo sean manejados por máquinas y en los que no exista ninguna posibilidad de contacto con la piel.

---

<sup>252</sup> Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio, por la que se modifica el anexo I del Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre, por el que se imponen limitaciones a la comercialización y uso de ciertas sustancias y preparados peligrosos (nonilfenol, etoxilados de nonilfenol y cemento).

<sup>253</sup> Directiva 2003/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de junio, por la que se modifica por vigesimosexta vez la Directiva 76/769/CEE del Consejo respecto a la limitación de la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos (nonilfenol, etoxilatos de nonilfenol y cemento).

## 8.5 NORMAS EUROPEAS

### 8.5.1 Normas técnicas

En la siguiente tabla se incluye un listado de normas relacionadas con las diferentes aplicaciones en las que se pueden emplear las escorias objeto del presente estudio.

Alguna de estas normas son normas armonizadas. Estas normas armonizadas<sup>254</sup> son un tipo concreto de normas europeas elaboradas por un organismo europeo de normalización a raíz de una solicitud, llamada "mandato", de la Comisión Europea para cumplir con los requisitos establecidos en una directiva europea y que deberán estar publicadas en el Diario Oficial de la UE. Estos organismos de normalización se organizan en comités técnicos que, a su vez, constituyen grupos de trabajo formados por expertos, que elaboran las normas europeas armonizadas EN teniendo en cuenta los requisitos establecidos en los mandatos y también los requerimientos nacionales y europeos que ya han sido desarrollados.

Las empresas pueden aplicar normas armonizadas para probar que sus productos o servicios cumplen los requisitos técnicos que contempla la legislación de la UE. Estos requisitos son obligatorios, mientras que la aplicación de las normas armonizadas es, por lo general, voluntaria. Las normas armonizadas establecen especificaciones técnicas que se consideran convenientes o suficientes para cumplir los requisitos técnicos de la legislación europea.

CEN es una de las tres organizaciones europeas de normalización (junto con CENELEC y ETSI)<sup>255</sup> que han sido reconocidas oficialmente por la Unión Europea y por la Asociación Europea de Libre Comercio (EFTA) como responsables de desarrollar y definir estándares voluntarios a nivel europeo. Proporciona una plataforma para el desarrollo de normas europeas y otros documentos técnicos en relación con varios tipos de productos, materiales, servicios y procesos.

CEN produce un conjunto de entregables, que difieren en los niveles de transparencia, consenso y aprobación requeridos antes de la emisión, y que ofrecen un medio flexible para satisfacer las necesidades del mercado en cuanto a requisitos técnicos e información. Entre estos, la Norma Europea (EN) es el principal entregable, produciendo otras publicaciones con diferentes objetivos, como la Especificación Técnica (CEN/TS), el Workshop Agreement, el Informe Técnico (CEN/TR), y la Guía CEN.

Las normas UNE-EN son la versión oficial en español de las normas europeas. Son normas adoptadas y armonizadas, tras la aprobación del órgano específico, dentro de la estructura de normalización nacional de AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación).

---

<sup>254</sup> European Commission. Harmonized Standards. <https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/>

<sup>255</sup> Los organismos de normalización son el European Committee for Standardization (CEN), European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) y European Telecommunications Standards Institute (ETSI) <https://boss.cen.eu>

**Tabla 8.5.1-1. Normas UNE- de referencia para los diferentes usos propuestos de las escorias.**

| Norma o estándar   | Objeto  |
|--|---|
| <b>Uso como árido. Aplicaciones no ligadas</b>                           |   |
| UNE-EN 932 (1-5): 1997   | Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos   |
| UNE-EN 933 (1-10):2012   | Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos   |
| UNE-EN 1097 (1-10):2011  | Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos   |
| UNE-EN 1367 (1-5):2008   | Ensayos para determinas las propiedades térmicas y de alteración de los áridos  |
| UNE-EN 1744 (1-3):2010+A1:2013   | Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos  |
| UNE-EN 12457 (1-4):2003  | Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos.   |
| UNE-EN 13242:2003+A1:2008  | Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes   |
| UNE-EN 13285:2010  | Mezclas de áridos sin ligante. Especificaciones   |
| UNE-EN 13450:2002/AC:2004  | Áridos para balastos  |
| UNE-EN146301:2002  | Áridos. Módulo de finura del árido o arena  |
| UNE -EN-16907 (1-3):2019   | Obras de tierra   |
| <b>Uso como árido. Aplicaciones ligadas</b>                              |   |
| UNE-EN 206:2013+A1:2018  | Hormigón. Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad  |
| UNE-EN 12620:2003+A1:2009  | Áridos para hormigón  |
| UNE 83992 (1-2):2012 EX  | Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón.   |
| UNE-EN 12697 (1-33):2013   | Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente   |
| UNE-EN 13043:2002/AC:2004  | Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas  |
| UNE-EN 13055-1:2003/AC 2004  | Áridos ligeros. Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado   |
| UNE-EN 13055-2:2005  | Áridos ligeros para mezclas bituminosas, tratamientos superficiales y aplicaciones en capas tratadas y no tratadas  |
| UNE-EN 13108 (1-21):2019   | Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales   |
| UNE-EN 13139:2002/AC:2004  | Áridos para morteros  |
| UNE-EN 13179 (1-2):2013  | Ensayos de los áridos fillers empleados en las mezclas bituminosas  |
| UNE-EN 13242:2003+A1:2008  | Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes   |
| UNE-EN 13282 (1-3):2013  | Conglomerantes hidráulicos para carreteras  |
| UNE-EN 14227 (1-15):2014   | Mezclas tratadas con conglomerante hidráulico. Especificaciones. Parte 2: Mezclas con aglomerante de escorias y Parte 12: Suelo Tratado con escoria   |
| <b>Como materia prima en la fabricación productos de la construcción</b> |   |
| UNE-EN 196 (1-11):2018   | Métodos de ensayo de cemento  |
| UNE-EN 197-1:2011  | Cemento. Parte 1. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes  |
| UNE 80304:2006   | Cementos: Cálculo de la composición potencial del clínker pórtland  |
| <b>Material abrasivo</b>   |   |
| UNE-EN ISO 11126-3:2019  | Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 3: Escoria del refinado de cobre |

## 8.5.2 Normas relativas a sustancias peligrosas en productos de la construcción

Con el objetivo de elaborar métodos de evaluación europeos relativos a las sustancias peligrosas en productos de construcción, incluidos los áridos, y para proporcionar información sobre la liberación de sustancias al suelo, a las aguas subterráneas y superficiales (y del aire interior), la Comisión dirigió el mandato M/366 a CEN/CENELEC, solicitando el desarrollo de métodos de evaluación horizontales para sustancias peligrosas. En la actualidad, los trabajos se centran en definir los métodos que se referirán de forma específica a los áridos y su forma de aplicación, a partir de los propuestos para la caracterización horizontal de la liberación de sustancias peligrosas en los productos de construcción, basados a su vez, precisamente, en los ensayos disponibles para residuos<sup>256</sup>.

Para ello, se creó un nuevo comité técnico, el CEN/TC 351<sup>257</sup>, designado como “Construction Products-Assessment of release of dangerous substances”. Los trabajos dirigidos a incorporar a las normas europeas de áridos, los métodos horizontales de evaluación de la liberación de sustancias peligrosas, establecidos por el TC351 de forma genérica para los productos de construcción, se llevan a cabo en el comité CEN/TC 154/WG13 “Dangerous substances”.

La estructura actual del comité CEN/TC 351 se divide en los siguientes grupos de trabajo (working group WG):

- CEN/TC 351/WG1 “Emisión de los productos de construcción al suelo y aguas superficiales y subterráneas”
- CEN/TC 351/WG2 “Emisiones al aire interior”
- CEN/TC 351/WG3 “Radiación de los productos de construcción”
- CEN/TC 351/WG4 “Terminología”
- CEN/TC 351/WG5 “Contenido y análisis de eluatos en productos de construcción”

En el grupo WG1 se han publicado los siguientes estándares<sup>258</sup>:

- PNE-prEN 16637-1:2018 Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Part 1: Guidance for the determination of leaching tests and additional testing steps.

Esta norma permite identificar el método de ensayo de lixiviación adecuado para determinar la liberación de los productos de construcción al suelo, las aguas superficiales y las aguas subterráneas a través de un procedimiento gradual basado en las propiedades generales y específicas del producto.

---

<sup>256</sup> Antonio Sánchez Trujillano, Laura Parra Ruiz, Julio Termenón Delgado. *Caracterización del comportamiento ambiental de áridos procedentes del reciclado de las escorias de acería de horno eléctrico para su empleo en construcción de carreteras* *Electric Arc Furnace Slags Aggregates Environmental Performance in Road Construction*. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/1387/1356>. 2018.

<sup>257</sup> <https://www.construction-products.eu/news-events/latest-news/centc-351-plenary-meeting-2018>

<sup>258</sup> [https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:32:0:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:531949,25&cs=1321F1576827FE511CF5DACFDD2AFCOC2](https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:32:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:531949,25&cs=1321F1576827FE511CF5DACFDD2AFCOC2)

Además, esta especificación técnica ofrece una orientación general a los Comités Técnicos de Producto del CEN y a los Grupos de Trabajo de la EOTA sobre los aspectos básicos (muestreo, preparación y almacenamiento de las muestras, tratamiento y análisis de los eluatos y documentación) que deben especificarse en las normas de producto.

- PNE-prEN 16637-2 Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Part 2: Horizontal dynamic surface leaching test (ensayo de lixiviación de superficie dinámica).

Esta especificación técnica aborda la prueba dinámica de lixiviación superficial (DSLTL) que tiene por objeto determinar la liberación por superficie de la unidad en función del tiempo, de sustancias orgánicas, inorgánicas y/o no volátiles de un producto monolítico, cuando se pone en contacto con una solución acuosa (lixiviante).

Esta prueba está centrada en identificar y determinar propiedades de ciertos parámetros en condiciones específicas. No está dirigido a simular situaciones reales. La aplicación de los resultados a condiciones específicas de uso previstas podrá establecerse mediante modelización.

Se aplica a las partículas granulares con baja conductividad hidráulica, es decir, con tan poca capacidad de drenaje entre los granos que la percolación en la práctica es casi imposible.

El método de ensayo se aplica sobre piezas de ensayo monolíticas con dimensiones mínimas de 40 mm en todas las direcciones (volumen > (64 cm<sup>3</sup>)). También se aplica a productos similares a placas o láminas con superficies mínimas de (100 cm<sup>2</sup>). Los productos diseñados para drenar agua (por ejemplo, baldosas de drenaje, asfalto poroso) y productos granulares monolíticos según CEN/TS 16637-1:2014, Tabla 1, también son ensayados por este método.

- prEN 16637-3:2021 Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Part 3: Horizontal up-flow percolation test (ensayo de lixiviación en columna con flujo ascendente).

Esta especificación aborda el ensayo de percolación de flujo ascendente, adecuado para determinar el comportamiento de lixiviación de las sustancias inorgánicas y orgánicas no volátiles de los productos de construcción granulares.

Los productos de construcción se someten a percolación con agua en función de la relación líquido/sólido en condiciones específicas. Es un ensayo de lixiviación en columna de un solo paso. Este ensayo de percolación de flujo ascendente se realiza en condiciones de ensayo específicas para los productos de construcción y no produce necesariamente resultados que imiten las condiciones específicas de uso previstas.

Este método de ensayo produce eluatos, que posteriormente pueden ser caracterizados por métodos físicos, químicos y ecotoxicológicos de acuerdo con los métodos estándar existentes. Los resultados del análisis de los eluatos se presentan en función de la relación líquido/sólido.

En este ensayo se aplican las mismas condiciones que en la norma prEN 17516 *Residuos. Caracterización de sólidos granulares con potencial para su uso como material de construcción.*

*Ensayo de conformidad por lixiviación. Ensayo de percolación de flujo ascendente.*<sup>259</sup>(CEN/TC 444/WG 1), con el fin de permitir la plena comparabilidad entre ensayos y poder verificar el cumplimiento de los valores límite reglamentarios de los productos de construcción y de los productos de construcción derivados de residuos, así como para evitar la realización de un doble ensayo.

Debido a este prerrequisito, se acepta que, si un material sólido granular que haya sido sometido al ensayo CEN/TS 16637-3 se rechaza como producto de la construcción y sigue siendo residuo, no es necesario que vuelva a realizar el ensayo conforme a la norma PNE-prEN 17516.

- CEN/TR17105:2017 Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Guidance on the use of ecotoxicity tests applied to construction products.

También resultan de interés los siguientes estándares que se están desarrollando y se encuentran aún en fase borrador<sup>260</sup>:

- prEN (WI=00351034) Construction products: Assessment of release of dangerous substances – Determination of the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) - Gas-chromatographic method with mass spectrometric detection.
- prEN 17331 (WI=00351051) Construction products: Assessment of release of dangerous substances – Content of organic substances – Methods for extraction and analysis.
- prEN 17332 (WI=00351052) Construction products: Assessment of release of dangerous substances – Analysis of organic substances in eluates.

Según CEDEX, algunas de las principales ventajas de los métodos de ensayos propuestos por este comité técnico, son que dan una información detallada, se pueden comparar (con ciertas cautelas) con los valores límite de vertederos, pueden ser útiles para establecer posibles criterios fin de la condición de residuo y podrían servir para una modelización.

---

<sup>259</sup> El comité [CEN/TC 444 - Caracterización ambiental](#) en su grupo de trabajo [WG 1 - Pruebas de lixiviación](#), se encuentra desarrollando esta norma que ha sido sometida a consulta pública. *PNE-prEN 17516. Residuos. Caracterización de sólidos granulares con potencial para su uso como material de construcción. Ensayo de conformidad por lixiviación. Ensayo de percolación de flujo ascendente.*

Los residuos sólidos granulares sin potencial de uso beneficioso quedan excluidos del ámbito de aplicación. Esta prueba es aplicable a los residuos sólidos granulares de los cuales se conoce el comportamiento general de lixiviación a largo plazo basado en investigaciones anteriores.

Los sólidos granulares que exhiben una conductividad hidráulica saturada de aproximadamente  $10^{-8}$  m/s o superior, generalmente pueden ser sometidos a esta prueba. Este procedimiento también es aplicable a los residuos sólidos granulares que muestran solidificación en la columna, si la conductividad hidráulica final está dentro del rango especificado.

<sup>260</sup>[https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:22:0:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:916161,25&cs=138AB279643DF91DA582925B2AE2510B6](https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:22:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:916161,25&cs=138AB279643DF91DA582925B2AE2510B6)



Por otra parte, los trabajos dirigidos a determinar la **forma de aplicación** de estos ensayos a los áridos se llevan a cabo en el comité CEN/TC 154/ WG13 “*Dangerous substances*”.

En este sentido, el Centro de Estudios del Transporte (CET) del CEDEX, que es miembro del citado grupo de trabajo y coordinador del grupo de trabajo espejo español (CTN 146 GT13), trabaja en la puesta a punto de los métodos de ensayo para evaluación de la liberación de sustancias peligrosas con objeto de evaluar si se pueden considerar métodos adecuados en el proceso de caracterización ambiental de los áridos para la construcción de carreteras. Los métodos de ensayo están ligados a los escenarios de uso previsto, definidos en función de la forma en la que el agua entra en contacto con el producto de construcción, según su ámbito de aplicación.

### 8.5.3 Normas relativas a la toma de muestras de áridos y residuos

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las normas armonizadas o estándares, así como las recomendaciones que los distintos EEMM han establecido en la normativa o guías que abordan el empleo de las escorias como árido, que permita tomar una muestra representativa del lote de material generado sobre la que comprobar tanto la calidad técnica del material como su conformidad ambiental.

**Tabla 8.5.3-1. Normas o estándares recomendados en los EEMM para el muestreo de las escorias**

| EEMM    | Normas áridos   | Normas residuos   | Recomendaciones para la toma de muestras   |
|---------|---|---|--|
| Francia | UNE-EN 932-1:1997. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo. | UNE-CEN/TR 15310-1:2008. Caracterización de residuos. Muestreo de residuos. Parte 1: Orientación en la selección y aplicación de los criterios de muestreo bajo diversas condiciones.<br>NF EN 16192: Caracterización de residuos - Análisis de eluatos <sup>261</sup><br>NF EN 15192: Caracterización de residuos y suelos - Determinación de cromo (VI) en materiales sólidos por digestión alcalina y cromatografía iónica con detección espectrofotométrica | Tomar (al menos) 24 muestras de masa m (1 kg, 2,5 kg o 5 kg, según la granulidad máxima). Cada muestra unitaria se tomará aleatoriamente del lote para cubrir todo el volumen considerado, en las diferentes zonas de la pila y a diferentes profundidades.<br>Las recomendaciones de guías, la norma NF EN 932-1 ofrecen ejemplos de métodos prácticos en función de la forma de la pila.<br>La muestra compuesta global para enviar al laboratorio para su caracterización estará formada (como mínimo) por 24 muestras individuales. Para ello, la reducción del tamaño de esta muestra (submuestreo) podrá realizarse mediante pala alternada, despiece manual o mediante el uso de un divisor automático de muestras, con el fin de obtener la cantidad ad hoc de muestra |

<sup>261</sup> Se corresponde con la norma española UNE EN 16192:2012, que especifica métodos para la determinación de los parámetros pH, amoníaco, As, Ba, Cd, cloruros, cianuro fácilmente liberable, Co, Cr, CrVI, Cu, COD/COT, conductividad eléctrica, fluoruros, Hg, Mo, Ni, nitritos, Pb, índice de fenol, S total, Sb, Se, sulfatos, sólidos totales disueltos y Zn en eluatos acuosos, para la caracterización de residuos.

| EEMM         | Normas áridos   | Normas residuos   | Recomendaciones para la toma de muestras  |
|--------------|---|---|---|
|              |   |   | <p>de ensayo necesaria para su envío al laboratorio (mínimo de 2 kg para muestras d95 &lt; 20 mm, mínimo de 4 kg para muestras d95 &lt; 20 mm y un mínimo de 8 kg para muestras d95 &gt; 50 mm)</p> <p>Este método tiene por objeto garantizar que la muestra sea representativa en relación con todos los materiales alternativos fabricados en el lote formado durante un período determinado</p>   |
| Italia       | UNI EN 932-1 Ensayo para determinar las propiedades generales de los áridos.  | <p>UNI 10802 "Residuos. Muestreo manual, preparación de muestras y análisis de eluatos".</p> <p>UNI EN 1744-3. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 3: Preparación de eluatos por lixiviación de áridos</p>  | -   |
| Países Bajos | UNE-EN 932-1:1997. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo                      | -   | Las guías de certificación establecen la necesidad de disponer de un plan de muestreo. En las guías se definen las condiciones, tamaños de muestra, etc. en función de la granulometría.  |
| Suiza        | -   | <p>"Muestreo de residuos sólidos" de la Ejecución de OLED.</p> <p>Las muestras deben ser preparadas y analizadas de acuerdo con los requisitos de la guía "Métodos de análisis de residuos y suelos contaminados" (FOEN,2017)</p>   | Muestra representativa mensual (para un tamaño de grano entre 0 y 45 mm, 25 kg) de escoria triturada. Cada 6 meses, análisis por laboratorio independiente de una muestra compuesta por las submuestras recogidas cada mes.   |
| Alemania     | DIN 932-2 Métodos de ensayo de las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Método para la reducción de muestras de laboratorio; | <p>DIN 19698-2 Caracterización de sólidos. - Muestreo de materiales sólidos y semisólidos</p> <p>- Parte 2: Orientación para la toma de muestras de existencias para caracterización integral en relación con la norma DIN 19747 Investigación de sólidos - Pretratamiento, preparación y procesamiento de muestras para investigaciones químicas, biológicas y físicas</p> | Los ensayos se realizarán sobre el material con el tamaño de grano en el que se va a comercializar. Si se va a comercializar en más de un tamaño de grano, se podrá utilizar para los procedimientos de control una granulometría de prueba que caracterice el material de construcción sustitutivo de acuerdo con el organismo de control en el rango de tamaño de partícula de 0 mm a 22,4 mm con una fracción de partículas menor de 4 mm de al menos el 45 % en masa. |

## 9. ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO

### 9.1 CONCLUSIONES DEL GRUPO DE TRABAJO Y APORTACIONES DE LAS CCAA

#### Conclusiones del Grupo de Trabajo noviembre 2019

El día 27 de noviembre de 2019, se celebró una reunión del Grupo de Trabajo de subproductos y fin de condición de residuo de la Comisión de Coordinación en Materia de Residuos con representantes de las CCAA en el que se trataron, entre otros temas, las solicitudes recibidas de declaración de subproducto relativas a las escorias y cuyas conclusiones se resumen a continuación.

En esta reunión el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) explica que se ha llevado a cabo el análisis de un total de nueve solicitudes de subproducto relativas a cuatro tipos de escoria diferentes; escorias de acería (negras y blancas), escorias de silicomanganeso y escorias de cobre. Los usos propuestos en las distintas solicitudes abarcan diferentes ámbitos del sector de la construcción tales como la construcción de carreteras y vías ferroviarias o la fabricación de cemento u hormigón entre otros, aunque todas pueden aglutinarse en torno a dos tipos de aplicaciones generales: aplicaciones ligadas y aplicaciones no ligadas.

El País Vasco expuso los puntos destacados sobre las escorias negras de acería, así como su experiencia a lo largo del tiempo en la utilización de este tipo de escorias como árido siderúrgico destacando los siguientes aspectos:

- Con objeto de promover el uso del árido siderúrgico el decreto de valorización del País Vasco se ha actualizado. El nuevo decreto no regula las escorias blancas como el anterior, ya que éstas únicamente se utilizan en las plantas cementeras y dicho uso se viene realizando sin problemática alguna. Por otra parte, el decreto pretende armonizar los ensayos de lixiviación con la legislación de vertederos. El nuevo decreto se encuentra en línea con la norma desarrollada en Reino Unido y regula exclusivamente la parte ambiental derivada del uso de las escorias, aunque también se recogen cuestiones técnicas, como la obligación de controlar la expansividad.
- Se señala que la escoria negra no debe utilizarse sin un tratamiento previo consistente en varias etapas que son la maduración, las desmetalización, el machaqueo, la criba, entre otras. Pueden utilizarse escorias de acero común, de alta aleación o de acero inoxidable, aunque son las primeras las que tienen mayor posibilidad de cumplir los requisitos técnicos exigidos y por tanto son las que tienen mayor potencial de uso.
- Se consideran aplicaciones ligadas, aplicaciones no ligadas con cobertura no impermeable y aplicaciones no ligadas con cobertura totalmente impermeable, estableciendo diferentes controles y límites en función de estas aplicaciones. El parámetro crítico para la utilización de las escorias negras se encuentra en su expansividad, debida muchas veces a la mala separación entre la escoria negra y la escoria blanca. Aunque no se establecen valores límite admisibles para este parámetro, pues estos se fijan en otra normativa técnica, el decreto sí obliga al control de la expansividad con el fin de que el destinatario conozca las características concretas del material y su viabilidad de uso.

- Se indica que es un material versátil y de alta calidad que debe necesariamente valorizarse y controlarse. Alrededor de un 80% de la escoria negra se valoriza en árido siderúrgico.

Tras la exposición de las solicitudes de escorias restantes, desde el MITERD se indicó que todas las solicitudes cumplen con la primera condición de subproducto. En cuanto a la segunda condición se considera que las escorias necesitan de un tratamiento previo para su utilización y, por tanto, no se cumpliría. En relación a la tercera condición existen dudas en su cumplimiento al introducir residuos como materia prima en el proceso productivo, hecho que asemeja el proceso productivo a un tratamiento de residuos. Respecto a la cuarta condición, ésta requiere de un análisis caso por caso ya que se puede cumplir o no en función del tipo de escoria y de las aplicaciones finales propuestas.

Por todo lo anterior, se señaló la intención de evaluar las diferentes solicitudes de escorias como subproducto recibidas en un único expediente de fin de condición de residuo que englobase los distintos tipos de escoria y usos, aunque no en todos los casos está tan clara su inclusión, en función de que el resultado de la evaluación como tal fuese favorable o desfavorable, debiendo permanecer en este último caso bajo el régimen de residuos.

Los asistentes presentes consideraron, en general, adecuada la figura de fin de condición de residuo para este tipo de materiales. No obstante, desde el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico se solicitaron aportaciones por escrito a las CCAA sobre la exclusión o no de las escorias del procedimiento de declaración de subproducto.

### **Aportaciones de las CCAA**

A continuación, se resumen las respuestas de las CCAA tras la solicitud de aportaciones por parte del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico en reunión del Grupo de Trabajo de 27 de noviembre de 2019.

- Cataluña: considera, respecto a la tercera condición de declaración de subproducto, que puede haber procesos de producción que originen productos, independientemente si se fabrican a partir de materias primas o de residuos, por lo que se cumpliría esta condición.

Así mismo, indica que este es el caso de la obtención de acero a partir del procesado de chatarra, pudiendo ocurrir además que la chatarra introducida en el inicio del proceso productivo se ajuste al reglamento comunitario de fin de condición de residuo<sup>262</sup>.

- País Vasco: respecto a la tercera condición de declaración de subproducto indica que la *Ley 22/2011, de 28 de julio*, no restringe la utilización de residuos en el proceso productivo y por tanto el procedimiento debería quedar abierto a esta posibilidad.

---

<sup>262</sup> *Reglamento (UE) nº 333/2011 del Consejo, de 31 de marzo, por el que se establecen criterios para determinar cuándo determinados tipos de chatarra dejan de ser residuos con arreglo a la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.*

Señala que la exclusión citada en el procedimiento de declaración de subproducto<sup>263</sup>, “*quedarán por tanto excluidos los materiales/sustancias obtenidos en el tratamiento de residuos*”, hace referencia al nuevo producto obtenido realizado por un gestor de residuos, es decir, lo que está regulado por el propio fin de condición de residuo y que no debería cerrarse la posibilidad de declaración a ciertos gestores de residuos que puedan generar potenciales subproductos, siempre y cuando se cumplan las cuatro condiciones citadas en la ley.

El País Vasco considera que, en el caso concreto de las escorias, la exclusión del procedimiento de declaración de subproducto debe ser motivado por el incumplimiento de la segunda condición, ya que es necesario un tratamiento específico para su utilización, y no por el hecho de introducir chatarra como materia prima en el proceso productivo, aunque las instalaciones sean gestores de residuos.

- Murcia: considera que, si existe un tratamiento de residuos, el material debe tramitarse mediante el procedimiento de fin de condición de residuo.
- Navarra: indica que un subproducto debe proceder de un proceso industrial diferente a la gestión y/o el tratamiento de un residuo, ya que de lo contrario la casuística sería demasiado amplia pudiéndose dar situaciones problemáticas y complejas, por ejemplo, en aquellas instalaciones de tratamientos fisicoquímicos de residuos que reciben ácidos y bases de neutralización y/o precipitación.
- Galicia: indica que los materiales obtenidos mediante un tratamiento de residuos podrán considerarse como un producto únicamente a través del procedimiento de fin de condición de residuo, ya que el tratamiento de un residuo no puede considerarse un proceso productivo y, por tanto, no pueden generar en ningún caso un subproducto.

## 9.2 ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, tomando en consideración toda la documentación aportada en el presente estudio, y a la vista de lo establecido en el artículo 5 de la *Ley 22/2011, de 28 de julio*, en el que se establece que “*se podrán establecer los criterios específicos que determinados tipos de residuos, que hayan sido sometidos a una operación de valorización, incluido el reciclado, deberán cumplir para que puedan dejar de ser considerados como tales, a los efectos de lo dispuesto en esta ley y siempre que se cumplan una serie de condiciones*”, procede seguidamente analizar si las escorias tratadas adecuadamente cumplen con las cuatro condiciones establecidas en el citado artículo.

---

<sup>263</sup>[https://www.miteco.gob.es/en/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/171212procedimientodeclaracionsubproductoaprobado20171212\\_tcm38-435981.pdf](https://www.miteco.gob.es/en/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/171212procedimientodeclaracionsubproductoaprobado20171212_tcm38-435981.pdf)

**a) ¿Las escorias de fundición de horno de arco eléctrico procedentes de la producción del acero al carbono, del cobre y de aleaciones de silicomanganeso se usan habitualmente para finalidades específicas?**

El sector de los áridos es el principal suministrador de materias primas para la construcción de infraestructuras, así como para la edificación en general. Los áridos se emplean en estas obras, como hormigón preparado, prefabricados de hormigón (el 80% del hormigón son áridos), mortero, aglomerados asfálticos (el 95% son áridos), construcción de carreteras (el 94% de los materiales necesarios para una carretera son áridos), ferrocarriles (balasto), etc. Históricamente las escorias se han venido utilizado en estas y otras aplicaciones.

En el presente estudio se han descrito de manera concreta para cada tipo de escoria las aplicaciones principales que, generalmente, competen al sector de la construcción, utilizándose como árido artificial para distintos fines que se pueden clasificar en dos amplios grupos: uso como árido en aplicaciones ligadas y no ligadas y otros usos, entre los que se incluyen su empleo como materia prima en la fabricación de productos de la construcción y como material abrasivo en el caso de las escorias de cobre.

En el siguiente cuadro se incluyen los principales usos identificados según las solicitudes previas de declaración como subproducto, de las escorias de acero al carbono, la escoria de silicomanganeso y la escoria de cobre, clasificados según el tipo de aplicación.

**Tabla 9.2-1. Aplicaciones específicas de las escorias objeto de estudio.**

| Tipo de escoria   | Tipo de aplicación  | Finalidad específica   |
|---|---|--|
| Escoria negra de acero al carbono (EAF-C)                         | Uso como árido en aplicación ligada                               | Árido en mezcla bituminosa   |
|   |   | Árido en hormigón  |
|   |   | Árido con cemento o gravacemento   |
|   | Uso como árido en aplicación no ligada                            | Árido en zahorra para la construcción de firmes de carretera (base, subbase, explanada mejorada) |
|   |   | Árido en rellenos, terraplenes   |
|   |   | Árido en proyectos de urbanización industriales  |
|   | Como materia prima en la fabricación de productos de construcción | Árido para balasto/sub-balasto   |
| Como materia prima en la fabricación de productos de construcción | Fabricación de clínker  |  |
| Escoria blanca de acero al carbono (LFS)                          | Como materia prima en la fabricación de productos de construcción | Fabricación de clínker   |
| Escoria de silicomanganeso  | Uso como árido en aplicación ligada                               | Árido en hormigón  |
|   | Uso como árido en aplicación no ligada                            | Árido en zahorra   |
|   | Como materia prima en la fabricación de productos de construcción | Fabricación de cemento (como adición activa)   |
|   |   | Fabricación de clínker   |

| Tipo de escoria  | Tipo de aplicación  | Finalidad específica                 |
|------------------|---|--------------------------------------|
| Escoria de cobre | Como materia prima en la fabricación de productos de construcción | Fabricación de clínker               |
|                  | Otros usos  | Material abrasivo                    |
|                  | Uso como árido en aplicación no ligada                            | Árido para relleno (cama de tubería) |

Según la tabla anterior, las escorias procedentes de la producción del acero al carbono, del cobre y de aleaciones de silicomanganeso se usan habitualmente para finalidades específicas distintas, cumpliendo así con la primera de las condiciones para poder alcanzar el fin de la condición de residuo.

Asimismo, existe suficiente normativa técnica de ámbito nacional que permite el uso de las escorias, en las diversas aplicaciones, establecida principalmente en las normas de construcción de carreteras como el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*, en sus distintos artículos, pero también en otras normas como el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios (PF)* y la *Instrucción del Hormigón Estructural (EHE-08)* o la *Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16)*.

La mayoría de estas normas prevén la utilización de materiales granulares reciclados y otros materiales residuales como material de la construcción, así como áridos siderúrgicos<sup>264</sup>, es decir, de aquellas escorias procedentes de procesos de fundición ferrosos como las escorias negras y blancas, aunque no contemplan de forma explícita aquellas que tienen su origen en procesos de fundición no ferrosos, como las escorias de cobre o de las ferroaleaciones, como las escorias de silicomanganeso.

Para estos dos últimos tipos de escorias, la viabilidad técnica de la mayor parte de los usos se analiza y se justifica, además de en diversos artículos científicos u otros estudios, en diversa bibliografía de referencia como en la Guía Tecnológica. Directiva 96/61 relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Epígrafe 2.5. Ferroaleaciones del Ministerio de Industria y Energía o en el Documento de referencia BREF de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales No Férreos.

Finalmente, en Europa se han identificado diferentes EEMM que han desarrollado normativa que regula o guías que abordan el uso de áridos derivados de residuos para ser usados como materiales de construcción, entre los que se encuentran las escorias objeto de estudio.

<sup>264</sup> En concreto, en gran parte del articulado del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), se ha impulsado la introducción del árido reciclado y artificial como árido alternativo al natural, como en el artículo 510 relativo a las zahorras, en el artículo 513 correspondiente al material tratado con gravacemiento, artículos 540 542 y 543 relativos a las mezclas bituminosas, artículo 550 pavimentos de hormigón, artículo 551 hormigón magrovibrado, así como el artículo 332 relativo a los rellenos localizados y 330 terraplenes.

En consecuencia, teniendo en cuenta la variada normativa que permite el empleo de materiales de construcción alternativos a las materias primas vírgenes, entre los que se incluyen las escorias objeto de estudio, así como la amplia bibliografía en la que se justifica la viabilidad técnica de las citadas escorias para diversas aplicaciones, se puede considerar que los tres tipos de escorias contempladas se destinan a distintos fines específicos como material de la construcción y, por tanto, **se cumple la primera condición.**

**b) ¿Existe un mercado o una demanda de las escorias de fundición de horno de arco eléctrico procedentes de la producción del acero al carbono, del cobre y de aleaciones de silicomanganeso para su utilización?**

Según apunta la Asociación Europea que representa a los productores y procesadores de escoria (EUROSLAG), la mera mención a las condiciones de utilización de las escorias en buena parte de las normas técnicas europeas prueba la existencia de un mercado europeo permanente y recurrente que garantiza el uso de éstas y que se traduce en una gran demanda de este tipo de materiales, superando en algunos países a la capacidad de producción de estas. No obstante, EUROSLAG señala que en ciertos países este escenario puede ser diferente debido a la gran competencia con los áridos naturales.

Esta afirmación se encuentra en línea con otros documentos<sup>265</sup> que señalan que cuando el consumo de la industria de la construcción es débil y la competencia con materiales naturales es fuerte, se hace difícil vender toda la escoria generada. Este puede ser el caso de España, ya que existe gran cantidad de canteras de buena calidad, al contrario de lo que ocurre en la mayoría de los países europeos.

Otro de los factores que puede comprometer la demanda de las escorias, especialmente de las escorias siderúrgicas según la bibliografía consultada, es la distancia entre la instalación de producción y el cliente puesto que, debido a los costes en el transporte, su utilización no resulta rentable a distancias superiores a los 100-150 km, motivo por el que la importación de las escorias entre países es poco frecuente.

En el caso concreto de las escorias citadas en el presente estudio la demanda de estas se encuentra certificada mediante acuerdos y pedidos adjuntados en las solicitudes de declaración como subproducto realizadas previamente:

- Escoria negra

En 2016 se produjeron en España 964.272 toneladas de escoria negra de las cuales un 5% se utilizó como árido en aplicaciones ligadas (hormigón) y en la fabricación de cemento y un 49% en construcción de carreteras (uso como árido).

Numerosas empresas receptoras del material solicitaron de forma conjunta la declaración de las escorias negras como subproducto, lo que indica el interés en el uso de ésta. Esta demanda puede ser continuada o

---

<sup>265</sup> A. Méndez. *Proyecto sobre Residuos: Utilización de Escorias como Sustitutos de Áridos. Máster Profesional e Ingeniería y Gestión Medioambiental. Escuela de Organización Industrial. 2010-2011.*



esporádica según las condiciones de mercado para los diferentes usos y de la disponibilidad del material en los centros de producción, por lo que puede darse el caso de que quede almacenada cierto tiempo.

Según informaciones de los productores de la escoria, no toda la escoria generada puede utilizarse para las aplicaciones propuestas, por lo que una parte es gestionada como residuo mediante gestor autorizado, siendo su destino el vertedero.

Por otra parte, existe una limitación económica por costes de transporte debido a su alta densidad en comparación con los áridos naturales o reciclados a los que sustituye, no saliendo rentable su uso en caso de transportes a distancias superiores a 100 km.

Otra limitación es el tamaño de las obras a suministrar, no pudiéndose atender por lo general volúmenes importantes de material, cuya disponibilidad está condicionada por la capacidad de generación del material.

- Escoria blanca

En 2017, según la información aportada en los expedientes de solicitud de declaración de subproducto de uno de los mayores productores de escoria blanca en nuestro país, la intención de pedidos para el uso de la escoria blanca como materia prima en la fabricación de clínker alcanzaba la totalidad de la cantidad producida. No obstante, se indicaba que no toda la escoria generada puede utilizarse para la aplicación propuesta, por lo que parte es gestionada como residuo mediante gestor autorizado, siendo su destino el vertedero.

Por otra parte, cabe señalar la postura del País Vasco que en su nuevo decreto de valorización de escorias no regula las escorias blancas como sí hacía el anterior, ya que éstas únicamente se utilizan en las plantas cementeras y dicho uso se viene realizando sin problemática alguna.

- Escoria de silicomanganeso

La solicitud de subproducto presentada por la única compañía que produce ferroaleaciones en España indicaba que, desde hace varios años, existe una demanda de todas las escorias producidas en las tres instalaciones con las que cuenta, cuyo destino es todo tipo de obra civil, construcción de viales y carreteras. Esta demanda se encuentra justificada por distintos contratos de compraventa entre las empresas productoras y las empresas interesadas en la utilización de las escorias.

Se adjunta tabla con las ventas de la escoria de SiMn hasta el año 2015, así como su tasa de utilización en relación con la cantidad producida de las mismas.

**Tabla 9.2-2. Producción, venta y utilización de escorias de SiMn.**

| Año  | Producción(t) | Ventas (t) | Tasa utilización (%) |
|------|---------------|------------|----------------------|
| 2010 | 197.760       | 147.967    | 75                   |
| 2011 | 213.347       | 105.794    | 50                   |
| 2012 | 235.835       | 131.851    | 56                   |
| 2013 | 208.933       | 178.370    | 85                   |
| 2014 | 202.843       | 173.757    | 86                   |

| Año      | Producción(t) | Ventas (t) | Tasa utilización (%) |
|----------|---------------|------------|----------------------|
| 2015     | 165.578       | 140.443    | 85                   |
| Total    | 1.224.296     | 878.182    | 72                   |
| Promedio | 204.049       | 146.364    | 72                   |

- Escorias de cobre

La solicitud de subproducto presentada por la única fundición y refinería de cobre en España, indica que la escoria de cobre es comercializada en su totalidad para distintos fines. Esta demanda se encuentra justificada por distintos contratos de compraventa entre las empresas productoras y las empresas interesadas en la utilización de las escorias, aunque no para la totalidad de esta, desconociendo el destino del resto de la escoria comercializada. En la siguiente tabla se muestra el histórico de producción y venta de la escoria de cobre desde el año 2011 para aquellas aplicaciones propuestas por la citada fundición:

**Tabla 9.2.-3. Producción y venta de escoria de cobre.**

| Año             | Producción(t) | Cementera (t) | Relleno (t) | Abrasivo (t) |
|-----------------|---------------|---------------|-------------|--------------|
| 2011            | 536.602       | 100.353       | -           | 5.367        |
| 2012            | 615.150       | 157.201       | -           | 12.382       |
| 2013            | 518.893       | 153.884       | -           | 7.441        |
| 2014            | 676.346       | 185.364       | -           | 5.000        |
| 2015            | 620.794       | 176.125       | 2.751       | 8.855        |
| 2016            | 671.883       | -             | 2.605       | -            |
| <b>Promedio</b> | 606.611       | 154.585       | 2.678       | 7.809        |

En consecuencia, teniendo en cuenta la existencia de un histórico de producción y venta de los tres tipos de escoria para distintas aplicaciones, así como la mención de su empleo en diferentes normas técnicas tanto a nivel europeo como español, se puede considerar que existe un mercado o demanda para los tres tipos de escorias y, por tanto, se **cumple la segunda condición**.

**c) ¿Las escorias de fundición de horno de arco eléctrico procedentes de la producción del acero al carbono, del cobre y de aleaciones de silicomanganeso cumplen los requisitos técnicos para finalidades específicas, la legislación existente y las normas aplicables a los productos?**

Tal y como indica el documento del JRC<sup>266</sup>, aunque solo hace referencia a las escorias de acería, las escorias se producen para cumplir los requisitos expresados en las normas europeas, hasta el punto de que la selección de materias primas no se realiza solo respecto a la producción del hierro o el acero sino también respecto a la composición química final de la escoria en función de su uso posterior. Por ejemplo, se añaden aluminatos en el proceso productivo con objeto de aumentar la alcalinidad de las escorias y su valor en la fabricación de cemento.

<sup>266</sup> European Commission. End of Waste -Aggregates Case Study. Working document. 2007.

Del mismo modo, como cualquier producto de la construcción, las escorias se encuentran incluidas en el ámbito del *Reglamento de Productos de la Construcción*, debiendo ser avaladas mediante el marcado CE en aquellos usos para los que resulte exigible. El marcado CE certifica que un producto cumple los requisitos esenciales de salud y seguridad de los productos de la construcción y demás normativas armonizadas de la UE.

Así mismo, existen numerosas normas para los productos de la construcción que regulan las propiedades que deben cumplir, así como los métodos de ensayos para su determinación, procedimientos para el control de calidad, etc., relacionadas con las diferentes aplicaciones en las que se pueden emplear las escorias objeto del presente estudio. Todos estos requisitos aparecen recogidos en el apartado “*Requisitos normativos o estándares*” en el presente estudio, desglosados en función del tipo de aplicación: uso como árido en aplicaciones ligadas y no ligadas y otros usos: como materia prima en la fabricación de productos de construcción y como material abrasivo en el caso de las escorias de cobre.

En el caso de las escorias de acero, la nota técnica NT03/2020 publicada por el MITMA, establece que **para cualquiera de los posibles empleos contemplados en el PG-3 es preceptivo que el árido siderúrgico procedente de este tipo de escorias, esté en posesión del marcado CE correspondiente**. De esta forma, se tendrá una garantía de que el material resultante del tratamiento cumple con las prescripciones técnicas necesarias para su uso como material de la construcción.

Según indican algunos solicitantes, la gran mayoría de las empresas productoras de escorias negras disponen ya del marcado CE para ciertas aplicaciones cubiertas por el distintivo o se encuentran en proceso de obtenerlo. Así mismo, según la información facilitada, las escorias de cobre poseen marcado CE conforme con el Reglamento de Productos de la Construcción, cumpliendo los requisitos de la norma armonizada UNE-EN 13242<sup>267</sup> para áridos. En el caso de las escorias de SiMn se conoce la existencia de alguna declaración de prestaciones para la zahorra fabricada con escoria de SiMn, pero se desconoce si esto es habitual o esporádico.

Así mismo, algunos solicitantes señalan que, de manera general, las escorias que acceden al mercado cumplen con los requisitos de los estándares nacionales y europeos y las especificaciones relativas a los aspectos técnicos que se aplican en función del uso al que irán destinadas. El fabricante es responsable de evaluar las prestaciones del producto y de poner en marcha el control de producción en fábrica, ya sea mediante sus procedimientos internos para el control de la calidad como con la colaboración de laboratorios externos o de proveedores de servicios.

Con objeto de que las escorias analizadas - acero al carbono, silicomanganeso y cobre- puedan llegar a cumplir con las especificaciones técnicas de los usos propuestos, deben tenerse en cuenta las siguientes singularidades:

---

<sup>267</sup> UNE-EN 13242:2003+A1:2008. *Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para su uso en capas estructurales de firmes*.

- Escoria negra

La viabilidad técnica de la escoria negra de acero como árido en aplicaciones no ligadas, ha sido justificada para la mayor parte de las aplicaciones a través de estudios técnicos que confirman el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa de aplicación. Pese a que el uso de la escoria tratada como árido en rellenos y terraplenes no se justifica de manera específica, el Libro Blanco del País Vasco indica que las escorias de acería apuntan a cumplir con creces, tras un tratamiento adecuado, todas las especificaciones que exigen los pliegos de carreteras, por lo que se considera que este uso también es apto.

En el caso de su uso como árido en aplicaciones ligadas, los estudios confirman la viabilidad técnica de la escoria negra tratada para su uso como árido en la fabricación de hormigones, siempre que se alcance una determinada finura de tamaño de grano a través de una adecuada molienda y/o mediante la adición de árido fino calizo, con el fin de resolver el problema de la falta de finos en este tipo de escorias. En este caso, se puede utilizar hasta un 100% de árido grueso de escorias, en cuyo caso el porcentaje de árido fino de escorias se limita al 30% (relativo al volumen total de árido fino). Si el árido grueso es natural, el porcentaje de árido fino de escorias puede ascender al 50%.

Finalmente, el CEDEX no recomienda el uso de las escorias negras en capas estabilizadas con cemento (gravacemento) o junto a obra de fábrica u otros elementos que restrinjan las posibles expansiones.

En el caso de su uso como materia prima en la fabricación de cemento, las escorias negras se pueden emplear como aporte de hierro, silicio y cal al horno rotativo en el proceso de fabricación del clínker con una dosificación máxima del 4%, para obtener un producto final de la calidad técnica adecuada, aunque hay estudios según los cuales se podría emplear un contenido de hasta el 30 %.

La bibliografía consultada considera como uno de los parámetros clave a controlar, el contenido de compuestos potencialmente expansivos: CaO y MgO libres, presentes en las escorias de acería, ya que pueden implicar fenómenos de inestabilidad de volumen a corto y medio-largo plazo, respectivamente.

Por ello, esta propiedad debe analizarse previamente para cada tipo de escoria mediante ensayos de expansión, delimitando los umbrales de expansión de los lotes, y contrastando los valores límite admisibles establecidos para el tipo de aplicación y/o prescripciones técnicas del pliego en cada caso de acuerdo con lo especificado en la norma *UNE EN 1744-. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico* y en función de los requerimientos de cada uso. Cuando se obtiene una expansión excesiva debe ser reducida mediante un tratamiento que contemple una estabilización por aire y/o agua.

En las escorias negras se dan valores de expansión variables, de entre <0,5 al 1,5%, en función de los tipos de acero. No obstante, los resultados analíticos confirman que el proceso de estabilización produce una reducción en los contenidos de los compuestos expansivos presentes en las escorias (sulfatos y magnesia libre) y la total desaparición de la cal libre, debido a su alta solubilidad en agua.

Debido a su **porosidad, su angulosidad y a la falta de finos**, las escorias pueden resultar incómodas de extender y compactar, por lo que **suelen combinarse con otros áridos (normalmente árido fino calizo)** para mejorar estos aspectos.

- Escoria blanca

Según la bibliografía consultada y la documentación facilitada en solicitudes previas de subproducto, la escoria blanca puede utilizarse en la fabricación de clínker, concretamente como materia prima en sustitución de la marga, debido al alto contenido de óxido de calcio (CaO), en línea con lo indicado en el *Catálogo de residuos utilizables en construcción "Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico"* publicado por el CEDEX o el Libro Blanco del País Vasco, que afirman que la única alternativa de valorización de las escorias blancas, confirmada por experiencias realizadas a escala industrial, es su utilización en las fábricas de cemento en sustitución de la marga.

No obstante, debe **considerarse su potencial expansivo** (contenido de MgO) que resulta mayor y más prolongado en el tiempo en el caso de escorias blancas saturadas en alúmina respecto a aquellas saturadas en sílice. El contenido de MgO de la escoria blanca se encuentra en valores de entre el 4,5 y 17,2%. Dado que el parámetro limitante es el magnesio, va a ser éste el que determine la máxima dosificación de escoria blanca, por lo general no mayor del 5% pudiendo llegar según ciertos documentos hasta el 15% de adición de escoria.

Por ello, esta propiedad debe analizarse previamente para cada tipo de escoria mediante ensayos de expansión, delimitando los umbrales de expansión de los lotes a emplear, y contrastar con los valores límite admisibles establecidos para el tipo de clínker y/o cemento en cada caso.

Debe controlarse igualmente el **contenido en fluoruros**, que aparecen en cantidades elevadas (1,4%) en la escoria blanca y que pueden influir negativamente en el clínker, la presencia de materiales extraños, como hierro y trozos de refractario fáciles de eliminar en origen, y la granulometría de la escoria, de manera que sea uniforme y de tamaño reducido (< 50 mm).

- Escoria de silicomanganeso

La viabilidad técnica de la escoria de SiMn como árido alternativo, ha sido justificada para diversas aplicaciones a través de estudios técnicos que confirman el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa de aplicación, bajo unas determinadas condiciones.

En relación con el uso como árido en aplicaciones no ligadas, se concluye que es posible el uso de las escorias de SiMn como zorra para la construcción de firmes, habitualmente empleada para constituir capas granulares de base/subbase, **pero limitando su uso únicamente a firmes de categoría de tráfico T3, T4 (firmes de tráfico bajo) bajo unas determinadas condiciones.**

En concreto, parece requisito indispensable que la escoria de SiMn sea mezclada con otro tipo de materiales (en al menos un 25 % de árido fino) o se someta a un proceso adecuado de machaqueo o cribado para poder cumplir ciertas especificaciones definidas en el PG-3, concretamente el contenido de azufre, los husos granulométricos y la resistencia a la fragmentación. El estudio revisado también indica que es posible el uso de la escoria de SiMn en explanadas.

En el caso de su uso como árido en aplicaciones ligadas, los estudios confirman la viabilidad técnica de la escoria de SiMn tratada para su uso como árido en la fabricación de hormigones. Concretamente, se puede utilizar hasta un 100 % de árido grueso (gravas) de escorias de SiMn para la fabricación de hormigones convencionales, ya que se cumplen todas las especificaciones establecidas en los estándares y normativa que los regulan.

Respecto a su uso como materia prima en la fabricación de productos de construcción, pese a que los estudios señalan que la escoria de SiMn tratada es apta para su empleo como adición activa en la fabricación de cementos tipo II en un porcentaje máximo del 30%, se recomienda adicionarlas como componente minoritario hasta un 5% en peso de cemento hasta que se homologue su utilización como componente principal. Adicionalmente, la bibliografía consultada considera que, para poder ser empleada en un sistema cementoso, la escoria deber ser llevada a una finura aceptable (6.600 de finura Blaine).

Por otra parte, pruebas recientes a nivel industrial han demostrado el éxito en el uso de la escoria de SiMn como materia prima en la fabricación de clínker como fuente de CaO y otros componentes, aunque estableciendo ciertos condicionantes de carácter técnico. Concretamente, se recomienda una dosificación máxima de la escoria de SiMn en la fabricación del clínker del 3% para evitar problemas de carácter técnico, y a su vez, un contenido máximo de MnO en las escorias del 8% y del 5% en humedad.

- Escoria de cobre

La viabilidad técnica de la escoria de cobre como árido alternativo en relleno de zanjas, ha sido justificada a través de diferentes estudios técnicos. Cabe señalar que la escoria de cobre posee marcado CE conforme con la norma de especificaciones armonizada *UNE-EN 13242:2003 "Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes"*. No obstante, cabe destacar que la utilización de la escoria de cobre como relleno no es uno de los usos prioritarios o considerados en Flandes, prevaleciendo sus aplicaciones en usos ligados tipo hormigón o cemento.

En cuanto a su utilización como material abrasivo, la escoria de cobre es un sustitutivo común y ampliamente utilizado, según la bibliografía consultada, que cumple con los requisitos exigidos en la norma *UNE-EN ISO 11126-3:2019 "Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Especificaciones para materiales abrasivos no metálicos destinados a la preparación de superficies por chorreado. Parte 3: Escoria del refinado de cobre"*. No obstante, debe tenerse en cuenta el valor de densidad aparente de la escoria de cobre que, en ocasiones, puede ser inferior a lo especificado en la norma.

En el caso de su uso como materia prima en la fabricación de productos de construcción, los estudios confirman la viabilidad técnica de la escoria de cobre como corrector de hierro en la fabricación de clínker de cemento, cumpliendo con los requisitos técnicos demandados por el sector cementero en cuanto a contenidos de hierro, azufre y humedad. No obstante, la adición de componentes correctores solo es posible en una cierta cantidad que oscila entre el 1 y el 2%, pudiendo llegar al 5% según la norma *UNE-EN 197-1*.

Por todo lo expuesto anteriormente, las escorias analizadas - acero al carbono, silicomanganeso y cobre- tras un tratamiento adecuado pueden llegar a cumplir los requisitos técnicos, así como la legislación existente y las normas aplicables a los productos, para las diversas aplicaciones analizadas.

**d) ¿Las escorias de fundición de horno de arco eléctrico procedentes de la producción del acero al carbono, del cobre y de aleaciones de silicomanganeso generan impactos adversos para el medio ambiente o la salud humana?**

Las escorias analizadas en el presente estudio se encuentran registradas bajo el *Reglamento (CE) nº 1907/2006 (REACH)* como sustancias UVCB (Unknown or Variable composition, Complex reaction products or Biological materials), siendo materiales que cumplen con los criterios para no ser clasificados como peligrosos de conformidad con el *Reglamento (CE) 1272/2008, de 16 de diciembre, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas químicas (CLP)*, según informan los solicitantes. Sus códigos de identificación son los siguientes:

**Tabla 9.2-3. Códigos de identificación de las escorias.**

| Nombre           | NºCAS      | NºEC      | Nº REGISTRO REACH     |
|------------------|------------|-----------|-----------------------|
| Escoria negra    | 91722-10-0 | 932-275-6 | 01-2119485979-09-0078 |
| Escoria blanca   | 65996-71-6 | 266-004-1 | 01-2119487457-23-0063 |
| Escoria SiMn     | 69012-33-5 | 273-733-9 | 01-2119440597-32-0000 |
| Escoria de cobre | 67711-92-6 | 266-968-3 | 01-2119513228-45-0003 |

En relación con los productos de la construcción, el grupo de expertos de la Comisión Europea (Expert Group on Dangerous Substances), centrado en la liberación de sustancias peligrosas en estos productos, considera conveniente tener en cuenta los siguientes grupos de sustancias en cualquier tipo de material utilizado<sup>268</sup>:

- **Metales pesados/elementos traza** tales como cadmio, plomo, mercurio, níquel, cromo, cobre, zinc, cobalto, talio y vanadio.
- **Sustancias inorgánicas** como arsénico, cloruros, sulfatos, fluoruros, cianuros y asbestos.
- Contenido en materia orgánica (COT y DOC).
- Sustancias orgánicas como benceno, fenoles, PAH, PCT, PCB, dioxinas, furanos, creosota, hidrocarburos.

No obstante, tal y como se ha confirmado en comunicaciones con el Gobierno Vasco, las escorias proceden de un proceso térmico en el que se produce la combustión completa de los compuestos orgánicos, por lo que carecen de este tipo de sustancias. Solo Italia impone cierto límite de COD en las escorias negras.

<sup>268</sup> Alicia Moral Santa-Olalla. *Exigencias Ambientales que Deberán Satisfacer los Áridos Derivados de Residuos en Distintas etapas de su Ciclo de Vida. CEDEX. Congreso Nacional de Medio Ambiente. CONAMA 2012.*

En cuanto a la presencia del resto de compuestos en las escorias (metales pesados y sustancias inorgánicas), depende fundamentalmente del tipo de materias primas utilizadas en el proceso productivo. En el caso de las escorias negras de acería tiene una notoria influencia la composición de la chatarra utilizada, pudiéndose dar la siguiente casuística:

- El empleo de una chatarra de composición equivalente al producto producido no genera escoria.
- El empleo de una chatarra de composición homogénea en la elaboración de un tipo de producto genera una escoria de características homogéneas.
- El empleo de distintos lotes de chatarra en la elaboración de un tipo de producto genera tantas tipologías de escorias como lotes de chatarras hayan sido empleados.
- El empleo de distintos lotes de chatarra en la elaboración de distintos tipos de productos eleva en una potencia los tipos de escoria generados.

No obstante, al tratarse de un residuo sólido y debido a sus características físicas y químicas, está técnicamente confirmado que la lixiviación es el principal sistema potencial de emisión contaminante al medio, es decir, la emisión de los componentes presentes en la escoria hacia los suelos, aguas superficiales y subterráneas.

La liberación de los elementos presentes en las escorias y **sus posibles impactos ambientales derivados de su uso cabe esperar que sean notablemente inferiores en las aplicaciones ligadas o que se encuentren dentro de una matriz como el cemento**, según la bibliografía consultada.

Esta afirmación se encuentra en línea con lo indicado en el *Decreto 64/2019, de 9 de abril*, del País Vasco, que no establece valores límite de lixiviación a la escoria negra en aquellas aplicaciones ligadas, el *Decreto 100/2018, de 20 de diciembre*, de Cantabria, en el que se establece que los límites de lixiviación pueden no ser de aplicación en la fabricación de cemento u hormigón con escorias, o la guía francesa *Acceptability of Alternative Materials in Road Construction. Environmental Assessment*, que solo establece límites para las aplicaciones no ligadas de la escoria en la construcción de carreteras.

Así mismo, el documento del JRC *Study on methodological aspects regarding limit values for pollutants in aggregates in the context of the development of end-of-waste criteria under the EU Waste Framework Directive* de 2014 en relación a la utilización de áridos derivados de residuos, entre los que se pueden encontrar las escorias, señala que cuando estos materiales se encuentran ligados en materiales cementosos, la presencia de los áridos no suele provocar un cambio significativo en el comportamiento de lixiviación.

Por otra parte, para ciertas aplicaciones ligadas o para su uso como materia prima en la fabricación de productos de construcción, debe considerarse la *Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio*, que limita el contenido de cromo (VI) en el cemento y en los preparados que contienen cemento a 2 ppm en el caso de aquellas actividades en la que existe la posibilidad de contacto con la piel con el fin de proteger la salud de las personas.

En el caso del uso **como árido en aplicaciones no ligadas**, el hecho de que la mayor parte de los EEMM que han desarrollado normas o guías que regulan el uso de las escorias, así como los decretos de País Vasco,



Cantabria y Cataluña, hayan establecido valores límite de lixiviación en este tipo de aplicaciones, pone de manifiesto que **es preciso controlar la posible afección al suelo y a las aguas subterráneas especialmente en este tipo de usos**, teniendo en cuenta además que, de manera general, se constata un aumento de la liberación de las sustancias presentes en las escorias debido a cambios extremos de pH.

De manera específica, deben considerarse las siguientes singularidades para cada tipo de escoria:

- Escoria negra

La escoria negra contiene, según analíticas facilitadas, un gran contenido en hierro, manganeso, aluminio, magnesio y titanio procedente de sus componentes principales. También se evidencia una notable presencia de bario, boro, cobre, vanadio, zinc, cromo y azufre.

Estos metales pesados se encuentran incluidos en la estructura de la escoria y pueden ser liberados al medio en cierta medida, en condiciones concretas de humedad y pH. El potencial de liberación de éstos parece poco relevante en las escorias negras según las analíticas del lixiviado facilitadas en las distintas solicitudes de subproducto, en las que los valores de concentración de la mayoría de los parámetros se encuentran por debajo del límite de detección de laboratorio. Para aquellos parámetros detectados, estas analíticas muestran contenidos inferiores a los valores límite establecidos en la distintas normas nacionales e internacionales de referencia exceptuando el mercurio, el molibdeno, el selenio y los fluoruros, que superan alguno de estos límites en al menos una de las analíticas analizadas.

No obstante, la mayoría de la bibliografía consultada recomienda controlar la lixiviación de metales pesados en las escorias negras, prestando especial atención a los cuatro parámetros citados, pero también al vanadio, el bario y el cromo.

En cuanto al uso de la escoria negra en aplicaciones ligadas o como materia prima en la fabricación de productos de construcción, cabe esperar que los posibles impactos ambientales y a la salud humana derivados del uso de la escoria sean notablemente inferiores. Según la ficha del CEDEX de escorias de acería de horno de arco eléctrico, se ha podido demostrar que el uso de árido siderúrgico en una matriz bituminosa emite solamente una fracción pequeña de elemento lixiviado satisfaciendo los resultados de las normativas ambientales más exigentes.

- Escoria blanca

La escoria blanca se compone principalmente de óxido de calcio (CaO), en valores aproximados de entre 45-65% en peso, seguido por orden por el dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), el óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de magnesio (MgO) y se caracteriza por su bajo contenido en metales pesados, como por ejemplo en cromo, zinc o plomo (inferior al 1%) según la ficha técnica del CEDEX.

Según la bibliografía consultada, la escoria blanca se estabiliza formando estructuras vítreas hasta en un 98% de su composición cuando se enfría con agua, lo que constataría su baja capacidad de lixiviación y reducida solubilidad, aunque ciertos documentos indican cantidades apreciables de bario en el lixiviado de las escorias blancas.

Cabe esperar que tanto el lixiviado como los posibles impactos ambientales derivados del uso de la escoria blanca en aquellas aplicaciones ligadas sean notablemente inferiores. Así lo indican los distintos documentos consultados, como el Libro Blanco del País Vasco que no establece limitaciones medioambientales para este tipo de aplicación o el *Decreto 100/2018, de 20 de diciembre*, de Cantabria en el que los límites de lixiviación para las escorias podrán no ser de aplicación si se utilizan en la fabricación de hormigón o cemento.

La mayoría de los valores obtenidos en el lixiviado de los hormigones producidos con escoria blanca son inferiores a los detectados en el lixiviado del Cemento Portland. A este respecto, ciertos estudios concluyen que el uso de escoria blanca en una dosificación del 30% en hormigones en sustitución de cemento arroja una reducción en los valores de lixiviación de la mayoría de los parámetros analizados, siendo significativa la reducción de cromo debido al encapsulamiento de la escoria en la matriz cementante, pudiendo dar una idea del comportamiento en otras aplicaciones ligadas.

- Escoria de SiMn

Según los resultados analíticos, la escoria de SiMn se compone principalmente de óxido de silicio y cal, seguido de óxidos de aluminio, manganeso y magnesio, representando la suma de estos componentes casi el 90 % de su composición química. Como componentes minoritarios, se puede encontrar Fe, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, P, Zn, Cu y Cr en cantidades que pueden alcanzar hasta un centenar de ppm (mg/kg).

Los estudios de caracterización de la escoria y de su lixiviado, muestran que las concentraciones de metales pesados detectadas en el lixiviado son inferiores a los valores límite establecidos en la normativa empleada como referencia.

No obstante, aquellos parámetros que podrían presentar mayor problemática desde el punto de vista ambiental según los ensayos de disponibilidad máxima y la comparativa realizada con la normativa de protección de aguas subterráneas y superficiales (análisis realizado para obtener información orientativa en los escenarios más desfavorables), son selenio, zinc, níquel, bario, cloruros, fluoruros y sulfatos, así como antimonio, cromo, mercurio y molibdeno..

Por último, los ensayos de dependencia de pH de la escoria de SiMn muestran un comportamiento frente a la lixiviación variable, siendo predominante un aumento de la lixiviación de la mayoría de los metales cuanto más ácido es el medio. Estos resultados evidencian cambios en el comportamiento del lixiviado de la escoria en función del pH del entorno, por lo que deberían garantizarse unas determinadas condiciones de aplicación de la escoria con el fin de minimizar los posibles impactos debido a cambios extremos en el pH.

En cuanto a las aplicaciones ligadas o para el uso como materia prima en la fabricación de productos de construcción de la escoria de SiMn, según el estudio consultado, se puede concluir que el comportamiento de liberación en cementos con adición de escoria (relación 50/50) es similar al que presenta el cemento común, que permite evidenciar que la lixiviación de elementos en la escoria de SiMn es muy difícil si el material se encuentra agregado en una matriz como el cemento.

- Escoria de cobre

Según la composición analizada, la escoria de cobre posee un gran contenido de hierro y sílice procedente de sus componentes principales. También se evidencian concentraciones notables de cobre, zinc y aluminio y, en menor medida, de arsénico y plomo.

Según los resultados analíticos de los ensayos de columna, ciertos parámetros como cobre, molibdeno y antimonio presentan una capacidad de lixiviación que podría, en algún caso, ser superior a los valores límite considerados como referencia.

Teniendo en cuenta el escenario de aplicación, correspondiente a su empleo como árido para el relleno en zanjas de tubería (en el que existe una cierta probabilidad de fuga o rotura que podría incrementar el riesgo de lixiviación al entrar en contacto con agua), así como su consideración en otros EEMM, como Flandes, en el que el uso de la escoria de cobre en rellenos es minoritario frente a su empleo en aplicaciones ligadas, **el uso de las escorias de cobre como árido para el relleno de zanjas para la instalación de tuberías no se puede considerar seguro.**

En cuanto al uso como material abrasivo, según ciertos documentos la utilización de la escoria de cobre puede romper las estructuras de vidrio del silicato provocando la liberación de metales pesados como arsénico, cromo y plomo, pudiendo superar los límites de exposición dictados por la OSHA. Por ello, se considera imperativo la necesidad de implantar un **sistema de gestión de seguridad y salud** que controle los posibles riesgos y reduzca la posible afección a la salud humana y al medio ambiente durante las actividades de abrasión con escoria de cobre.

En cuanto al uso de la escoria de cobre como materia prima en la fabricación de clínker, **cabe esperar que los posibles impactos ambientales y a la salud humana derivados del uso de la escoria sean notablemente inferiores a los que cabría esperar en aplicaciones no ligadas**, debido al encapsulamiento de la escoria en la matriz cementante. Según la información facilitada, ciertos elementos incrementan su presencia en el clínker fabricado con silicato de hierro (escoria de cobre) respecto a un clínker fabricado sin escoria, especialmente el molibdeno, el circonio o el cobre, aunque la mayoría de los compuestos se encuentran en el mismo orden de magnitud

### **Conclusiones ambientales y para la salud humana**

Por todo lo expuesto anteriormente, se pone de manifiesto que es preciso controlar la posible afección al suelo y a las aguas subterráneas derivada de la aplicación de las escorias de forma que su aplicación como producto no entrañe un impacto para el medio ambiente y la salud humana.

El hecho de que la mayor parte de los EEMM que han desarrollado normas o guías que regulan el uso de las escorias, así como los decretos de País Vasco, Cantabria y Cataluña, hayan establecido medidas adicionales de control en su empleo como árido en aplicaciones no ligadas, pone de manifiesto que, debido a las características físicas y químicas de las escorias, es preciso controlar la posible afección al suelo y a las aguas subterráneas, especialmente en este tipo de usos.

En concreto, establecen una serie de condicionantes y restricciones de uso, valores límite de contenido total y de lixiviado, empleo bajo determinadas condiciones de impermeabilización, etc., así como la necesidad de implantar procedimientos de control de calidad que permitan verificar el cumplimiento de estas condiciones. Países como Alemania señalaban específicamente que, incluso si las escorias fuesen clasificadas como subproducto (y por tanto ya no se consideran residuo), su potencial daño al medioambiente requiere la obligación de imponer medidas de control de calidad.

De manera particular, en el caso de Francia, Alemania y Suiza, al igual que en las normas de valorización de País Vasco y Cataluña, en las aplicaciones no ligadas se requiere el empleo de la escoria **bajo una capa que garantice cierta capacidad de impermeabilización** y, en caso de que no sea posible dicha capa, se exigen condiciones de uso más restrictivas que abarcan desde la prohibición de su uso en zonas de especial protección hasta su utilización con medidas de protección específicas o, en el caso concreto de Alemania, o bien se requiere alcanzar valores límite más restrictivos que los exigidos para unidades de obra con capa totalmente impermeable o, directamente, se restringen dichos usos.

Es decir, **para aquellas aplicaciones no ligadas en las que no se puede garantizar una impermeabilización total, los países evaluados han optado o bien por establecer condiciones de uso más restrictivas junto con valores límite más bajos o bien se han restringido dichos usos.**

Esta conclusión está en consonancia con lo establecido en un estudio del CEDEX en el que se evaluaron las posibilidades de utilización de determinados residuos en terraplenes, en el que se concluye que, **en función del tipo de residuo, puede ser habitual que, por condicionantes de tipo ambiental, se excluya el uso de las escorias en las zonas de coronación, espaldones y cimiento** que actúan como envoltorio del núcleo y en las que no se puede garantizar cierta impermeabilización.

En determinadas circunstancias más sensibles, como en aplicaciones fuera de los escenarios regulados y en áreas con protección a las aguas subterráneas y el medio natural, es práctica común plantear la necesidad de elaborar un Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) que identifique los niveles de riesgo para receptores en el emplazamiento y en el entorno.

Por otra parte, todos los países en los que se ha regulado el uso de la escoria tratada como árido alternativo en actividades de la construcción han establecido restricciones de uso relativas a la protección de aguas subterráneas o superficiales.

Los compuestos y elementos que potencialmente pueden liberarse al medio son metales pesados y sustancias inorgánicas cuyo contenido variará en función de las materias primas introducidas en el proceso productivo.

La liberación de estas sustancias y sus posibles impactos ambientales son diferentes en función de su uso ulterior y del pH, **pudiendo calificar los posibles impactos para la salud de las personas y el medio ambiente como bajos** en aquellas aplicaciones en las que la escoria se presenta embebida en una matriz, es decir, **en aquellas aplicaciones ligadas o cuando se emplee como materia prima en la fabricación de productos de construcción, pudiendo cumplir por tanto con la cuarta condición.**

No obstante, en los **usos como materia prima en la fabricación de productos de construcción (como la fabricación de cemento) o para aquellas aplicaciones ligadas que impliquen el uso de cemento o de sus preparados**), deberá tenerse en cuenta la *Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio*, que limita el contenido de cromo (VI) en el cemento y en los preparados que contienen cemento a 2 ppm.

El cumplimiento de esta condición en **aquellas aplicaciones no ligadas únicamente se podría garantizar siempre y cuando se estableciesen medidas adicionales de control, como el establecimiento de condicionantes y restricciones de uso, valores límite de composición y de lixiviación y/o controles de calidad.**

## 10. CONCLUSIONES

A continuación, se resumen las principales conclusiones obtenidas en el estudio:

- Se dispone de un marco normativo estatal y europeo que regula el uso de las escorias tratadas como material de la construcción.

Si bien no existe una normativa comunitaria que regule específicamente el uso de las escorias como material de construcción, su régimen jurídico viene configurado en determinadas CCAA que regulan la de cierto tipo de escorias, por medio de sus respectivos decretos, y a nivel europeo, por distintas normativas o guías que abordan el uso de áridos derivados de residuos, entre los que se encuentran las escorias.

Este es el caso de País Vasco, Cantabria y Cataluña, que establecen el régimen jurídico aplicable a las escorias negras procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico. Cantabria además regula otro tipo de escorias procedentes de procesos térmicos empleados en el ámbito de la comunidad autónoma, entre las que se encuentran las escorias blancas de acería y las escorias de silicomanganeso. Las escorias de cobre son las únicas que no aborda ninguno de los decretos autonómicos publicados hasta la fecha.

A nivel europeo, varios EEMM han desarrollado normativa que regula o guías que abordan el uso de áridos derivados de residuos para ser usados como materiales de construcción, entre los que se encuentran determinados tipos de escorias. Países Bajos, Flandes (Bélgica) y Alemania, regulan de forma general el uso de los materiales de construcción, entre los que se contemplan los áridos reciclados o artificiales; mientras que el resto regula de manera específica el empleo de estos residuos como material de la construcción a través de guías (Francia, Italia y Suiza) o a través de protocolos de calidad como Reino Unido.

La normativa identificada, tanto europea como autonómica, establece generalmente:

- controles a la entrada que limitan el tipo de escoria;
- usos ulteriores concretos en función de la escoria;
- condiciones de uso o aplicación y restricciones de uso;
- valores límite de concentración y/o de lixiviación para metales pesados y otros compuestos en función del tipo de material (conformado, no conformado) o del tipo de uso final (ligado, no ligado);

- implementación de un sistema de control de la calidad.
- El marco normativo que regula la utilización de áridos naturales como material de la construcción ha impulsado la introducción del árido reciclado y artificial como árido alternativo.

Muchas de las aplicaciones reguladas en la normativa de aplicación de obras en carreteras y obra civil, permiten el uso de áridos reciclados y/o áridos de origen industrial como material alternativo a los materiales pétreos.

En concreto, tanto el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*, la *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*, la *Instrucción para la recepción de cementos (RC-16)*., así como varias normas UNE EN armonizadas, han introducido en su articulado la posibilidad de emplear árido artificial como árido alternativo, con el fin de fomentar el aprovechamiento y/o reutilización de residuos.

De manera general, en estas normas se permite el uso de los materiales secundarios en algunas aplicaciones, pero sin desarrollar ninguna condición específica para el material. Únicamente debe cumplir lo exigido al material habitual, que sus características físico-químicas aseguren la estabilidad futura del conjunto y, en todo caso, que se esté a lo dispuesto en la legislación vigente en materia medioambiental, de seguridad y salud, y de almacenamiento y transporte de productos de construcción.

Del mismo modo, como cualquier producto de la construcción, las escorias se encuentran incluidas en el ámbito del *Reglamento de Productos de la Construcción*, debiendo ser avaladas mediante el marcado CE en aquellos usos para los que resulte exigible. Así mismo, existen numerosas normas para los productos de la construcción que regulan las propiedades que deben cumplir, así como los métodos de ensayo para su determinación, procedimientos para el control de calidad, etc., relacionadas con las diferentes aplicaciones en las que se pueden emplear las escorias objeto del presente estudio.

En el caso específico de la escoria negra de acería, el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) por medio de la Nota Técnica NT 03/2020<sup>269</sup> proporciona algunas directrices técnicas sobre el empleo de áridos siderúrgicos, en especial en el campo de las mezclas bituminosas para su utilización como árido en capa de rodadura.

- El marco normativo existente ha hecho posible el desarrollo de una actividad empresarial entorno a la utilización de las escorias.

Según la información consultada, la mera mención a las condiciones de utilización de las escorias en buena parte de las normas técnicas europeas prueba la existencia de un mercado permanente y recurrente que garantiza el uso de estas.

---

<sup>269</sup> Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.

En el caso de las escorias objeto de estudio, existe un mercado o demanda para la utilización de las escorias como material de construcción, ratificada mediante acuerdos y pedidos adjuntados en las solicitudes de declaración como subproducto previas y que conciernen a los principales productores de escorias nacionales, así como a múltiples receptores con capacidad de absorber buena parte del flujo de estos residuos.

No obstante, en nuestro país la competencia con materiales naturales puede ser fuerte debido a la cercanía a canteras naturales de gran calidad y tamaño, factor que junto a la distancia entre la instalación de producción y el cliente puede comprometer su utilización.

- Las escorias requieren necesariamente de un proceso de tratamiento para su utilización.

En función de la tipología de escoria, este tratamiento puede comprender acciones que alteren las propiedades físicas de la escoria, las propiedades químicas o ambas.

El proceso identificado generalmente contempla los siguientes tratamientos: tratamientos específicos de estabilización, meteorización o envejecimiento (en el caso de las escorias de acero), retirada de restos metálicos, tratamientos físicos como la trituración o el cribado y, paso previo a la expedición el material, la caracterización de la escoria que permita comprobar su viabilidad técnica y su conformidad ambiental. En función del tipo de escoria, estos tratamientos pueden aplicarse en su totalidad o parcialmente, así como con mayor o menor intensidad.

Las escorias negras y blancas son objeto generalmente de todas las acciones citadas con anterioridad, con periodos de estabilización (maduración) que pueden variar entre 72 horas y 4 meses en función del tipo de escoria, el proceso de estabilización y el objetivo de expansión deseable para una determinada aplicación.

Las escorias de SiMn también comparten generalmente todos los tratamientos citados, salvo la estabilización, no necesitando etapas de maduración o envejecimiento debido a la falta de componentes expansivos en su composición.

La escoria de cobre no requiere igualmente etapas de maduración o envejecimiento, careciendo de fenómenos de expansividad y tampoco se ha constatado la realización de la etapa de retirada de restos metálicos.

- Las escorias, tras un tratamiento adecuado, pueden ser valorizadas como material alternativo de construcción en diferentes aplicaciones que pueden agruparse en dos amplios grupos: uso como árido: en aplicaciones ligadas y no ligadas; y otros usos: como materia prima en la fabricación de productos de la construcción y como material abrasivo para las escorias de cobre.

Las escorias generadas tras el tratamiento correspondiente pueden llegar a cumplir con las especificaciones técnicas establecidas en la normativa de aplicación para un determinado uso, aunque deben tenerse en cuenta ciertas singularidades en función del tipo de escoria y el uso ulterior concreto. Los estudios disponibles confirman la viabilidad técnica de las escorias tratadas para su uso como:

### **Escoria negra**

- Árido en aplicaciones no ligadas: en la construcción de carreteras como zahorra en capas granulares en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras, terraplenes y rellenos o en la construcción de vías de ferrocarril (sub-balasto)
- Árido en aplicaciones ligadas: fabricación de hormigones, en morteros y como árido en capa de rodadura en mezclas bituminosas, siempre que se alcance una determinada finura de tamaño de grano a través de una adecuada molienda y/o mediante la adición de árido fino calizo, debido a la falta de finos en las escorias.
- Como materia prima en la fabricación de productos de construcción: fabricación de clínker.

Uno de los parámetros clave a controlar es el contenido de compuestos potencialmente expansivos, como CaO y MgO libres, que pueden implicar fenómenos de inestabilidad de volumen a corto y medio-largo plazo, respectivamente, motivo por el que el CEDEX no recomienda su uso en capas estabilizadas con cemento (gravacemento).

Por ello, esta propiedad debe analizarse previamente para cada tipo de escoria mediante ensayos de expansión, delimitando los umbrales de expansión de los lotes a emplear, y contrastando los valores límite admisibles establecidos para el tipo de aplicación y/o prescripciones técnicas del pliego en cada caso.

### **Escoria blanca**

La **escoria blanca** tratada, debido a sus características, es utilizada únicamente como materia prima en la fabricación de productos de construcción; concretamente en las fábricas de cemento en sustitución de la marga en la fabricación de clínker, confirmado por años de experiencia industrial.

La utilización de escorias blancas en cementeras es viable, por lo general, en porcentajes de dosificación no mayor del 5%, pudiendo llegar hasta el 15%, según distintas fuentes consultadas. El elemento limitante principal de estas dosificaciones es el magnesio debido a su potencial expansivo, por lo que es necesario controlar el contenido de MgO, no debiendo exceder por lo general el 5% de MgO, así como el contenido en fluoruros.

### **Escorias de SiMn**

Las **escorias de SiMn** tratadas se utilizan como:

- Árido en aplicaciones no ligadas: como zahorra en la construcción de firmes, como capa base/subbase, únicamente en firmes de categoría de tráfico T3, T4 (firmes de tráfico bajo) y bajo unas determinadas condiciones. Se requiere que la escoria de SiMn sea mezclada con otro tipo de materiales (al menos un 25 % de árido fino) o se someta a un proceso adecuado de machaqueo o cribado para poder cumplir ciertas especificaciones definidas en el PG-3, concretamente el contenido de azufre, los husos granulométricos y la resistencia a la fragmentación.
- Árido en aplicaciones ligadas como la fabricación hormigón, pudiendo utilizarse hasta un 100 % de árido (fino y grueso) de escorias de SiMn.



- Como materia prima en la fabricación de productos de la construcción:
  - como adición activa en la fabricación de cemento, en un porcentaje máximo del 30 % aunque los estudios recomiendan adicionarlas como componente minoritario hasta un 5% en peso de cemento hasta que se homologue su utilización como componente principal en la normativa correspondiente. Adicionalmente, la escoria deber ser llevada a una finura aceptable (6.600 de finura Blaine).
  - como materia prima en la fabricación de clínker: se recomienda una dosificación máxima de la escoria de SiMn del 3% y a su vez, un contenido máximo de MnO en las escorias del 8% y del 5% en humedad, para evitar problemas de carácter técnico.

### Escoria de cobre

La **escoria de cobre** tratada, por su parte, se utiliza como árido de relleno en cama de tubería en aplicaciones no ligadas, como materia prima en la fabricación de productos de la construcción, concretamente como corrector de hierro (componente minoritario) en la fabricación de clínker y como material abrasivo.

- En relación con los impactos al medio ambiente o a la salud de las personas derivados del uso de las escorias, se pone de manifiesto que es preciso controlar la posible afección al suelo y a las aguas subterráneas mediante el establecimiento de medidas adicionales tales como condicionantes y restricciones de uso, valores límite de composición y de lixiviación y/o controles de calidad, especialmente en su empleo como árido en aplicaciones no ligadas.

Bajo la interpretación de que se trata de materiales y no residuos, tras la entrada en vigor del *Reglamento REACH* en 2007, algunas empresas productoras iniciaron el procedimiento de registro de determinadas escorias, asumiendo de manera general que se trataba de subproductos o productos. Durante el proceso de registro se evaluaron y discutieron datos de composición de las escorias de los distintos procesos productivos en toda Europa, acordando que la mejor manera de definir el proceso productivo y la composición de éstas era a través de su registro como sustancias UVCB (*Unknown or Variable composition, Complex reaction products or Biological materials*) pudiendo utilizar su composición química como información adicional, disponiendo los tres tipos de escorias de su correspondiente número de registro REACH.

Por otra parte, pese a que la mayor parte de los valores detectados en el lixiviado de las escorias en función de las analíticas disponibles, se encuentran, de manera general, por debajo de los valores límite de referencia, todos los países que han regulado el uso de escorias, a excepción de Reino Unido, han establecido medidas adicionales de control.

El hecho de que la mayor parte de los EEMM que han desarrollado normas o guías que regulan el uso de las escorias, así como los decretos de País Vasco, Cantabria y Cataluña, hayan establecido medidas adicionales de control en su empleo como árido en aplicaciones no ligadas, pone de manifiesto que, debido a las características físicas y químicas de las escorias, es preciso controlar la posible afección al suelo y a las aguas subterráneas especialmente en este tipo de usos.

En concreto, establecen una serie de condicionantes y restricciones de uso, valores límite de contenido total y de lixiviado, empleo bajo determinadas condiciones de impermeabilización, etc., así como la necesidad de implantar procedimientos de control de calidad que permitan verificar el cumplimiento de estas condiciones. Países como Alemania señalan específicamente que, incluso si las escorias son clasificadas como subproducto (y por tanto ya no se consideran residuo), su potencial daño al medioambiente requiere la obligación de imponer medidas de control de calidad.

De manera particular, en el caso de Francia, Alemania y Suiza, al igual que en las normas de valorización de País Vasco y Cataluña, en las aplicaciones no ligadas se requiere el empleo de la escoria **bajo una capa que garantice cierta capacidad de impermeabilización** y, en caso de que no sea posible dicha capa, se exigen condiciones de uso más restrictivas que abarcan desde la prohibición de su uso en zonas de especial protección hasta su utilización con medidas de protección específicas o, en el caso concreto de Alemania, o bien se requiere alcanzar valores límite más restrictivos que los exigidos para unidades de obra con capa totalmente impermeable o, directamente, se restringen dichos usos.

Es decir, **para aquellas aplicaciones no ligadas en las que no se puede garantizar una impermeabilización total, los países evaluados han optado o bien por establecer condiciones de uso más restrictivas junto con valores límite más bajos o bien se han restringido dichos usos**, porque pueden implicar **mayor riesgo potencial** de generar una afección al medio.

Esta conclusión está en consonancia con lo establecido en un estudio del CEDEX en el que se evaluaron las posibilidades de utilización de determinados residuos en terraplenes, en el que se concluye que, en función del tipo de residuo, puede ser habitual que, por condicionantes de tipo ambiental, se excluya el uso de las escorias en las zonas de coronación, espaldones y cimiento que actúan como envoltorio del núcleo y en las que no se puede garantizar esta impermeabilización.

En determinadas circunstancias más sensibles, como en aplicaciones fuera de los escenarios regulados y en áreas con protección a las aguas subterráneas y el medio natural, es práctica común plantear la necesidad de elaborar un Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR) que identifique los niveles de riesgo para receptores en el emplazamiento y en el entorno.

Por otra parte, todos los países en los que se ha regulado el uso de la escoria tratada como árido alternativo en actividades de la construcción han establecido restricciones de uso relativas a la protección de aguas subterráneas o superficiales.

Los compuestos y elementos que potencialmente pueden liberarse al medio son metales pesados y sustancias inorgánicas cuyo contenido variará en función de las materias primas utilizadas en el proceso productivo y, en el caso de las escorias negras de acería, especialmente, del tipo de chatarra introducida.

La liberación de estas sustancias y sus posibles impactos ambientales son diferentes en función de su uso ulterior y del pH, pudiendo calificar esta posibilidad como baja en aquellas aplicaciones en las que la escoria se presenta embebida en una matriz, es decir, en las aplicaciones ligadas (fabricación de hormigón, mezclas bituminosas, morteros) o en los usos como materia prima para la fabricación de productos de la construcción (fabricación de clínker).

No obstante, en los usos como materia prima en la fabricación de productos de construcción (como la fabricación de cemento) o para aquellas aplicaciones ligadas que impliquen el uso de cemento o de sus preparados), deberá tenerse en cuenta la *Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio*, que limita el contenido de cromo (VI) en el cemento y en los preparados que contienen cemento a 2 ppm.

Finalmente, en su empleo como árido en aquellas aplicaciones no ligadas, únicamente se podría garantizar el uso de las escorias tratadas, siempre y cuando se estableciesen medidas adicionales de control, como el establecimiento de condicionantes y restricciones de uso, valores límite de composición y de lixiviación y/o controles de calidad.

Así mismo, deben tenerse en cuenta las siguientes singularidades en cada tipo de escoria:

La escoria negra posee cierto contenido en hierro, manganeso, aluminio, magnesio y titanio procedente de sus componentes principales. También se evidencia una notable presencia de bario, boro, cobre, vanadio, zinc, cromo y azufre entre sus componentes minoritarios. Los resultados analíticos sobre el lixiviado de la escoria negra muestran contenidos inferiores a los valores límite establecidos en la distintas normas nacionales e internacionales de referencia, exceptuando el mercurio, el molibdeno, el selenio y los fluoruros, que superan alguno de estos límites. La mayoría de los documentos consultados recomiendan controlar la lixiviación de estos cuatro elementos en la escoria negra, pero también del vanadio, bario y el cromo.

En cuanto al uso de la escoria negra en aplicaciones ligadas o se encuentre dentro de una matriz como el cemento, cabe esperar que tanto las concentraciones en el lixiviado como los posibles impactos ambientales y a la salud humana derivados del uso de la escoria, sean notablemente inferiores. Según los documentos consultados, se pone de manifiesto que la escoria embebida en una matriz emite solamente una fracción pequeña de elemento lixiviado, satisfaciendo los resultados de las normativas ambientales más exigentes.

La escoria blanca se compone principalmente de óxido de calcio (CaO), en valores entre 45-65% en peso, seguido por orden por el dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), el óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de magnesio (MgO) y se caracteriza por su bajo contenido en metales pesados existiendo trazas de algunos productos metálicos críticos como el plomo, níquel, cadmio, zinc, cobre, arsénico o mercurio. La escoria se estabiliza formando estructuras vítreas hasta en un 98% de su composición cuando se enfría con agua, lo que constataría su baja capacidad de lixiviación, aunque ciertos documentos indican cantidades apreciables de bario en el lixiviado de las escorias blancas. Cabe esperar que tanto el lixiviado como los posibles impactos ambientales derivados del uso de la escoria blanca como materia prima en la fabricación de clínker, sean notablemente inferiores.

La escoria se SiMn se compone principalmente de sílice, cal, alúmina, óxido de manganeso y magnesio, representando la suma de estos componentes casi el 90 % de su composición química. Los estudios de caracterización de la escoria y de su lixiviado indican concentraciones de metales pesados inferiores a los valores límite establecidos en el *Decreto 100/2018, de 20 de diciembre*, de Cantabria y a los valores de la normativa VLAREMA de Flandes.

Aquellos parámetros que podrían presentar mayor problemática desde el punto de vista ambiental según los ensayos de disponibilidad máxima y la comparativa realizada con la normativa de protección de aguas subterráneas y superficiales (análisis realizado para obtener información orientativa en los escenarios más

desfavorables), son selenio, zinc, níquel, bario, cloruros, fluoruros y sulfatos, así como antimonio, cromo, mercurio y molibdeno. Por último, los ensayos de dependencia de pH evidencian cambios en el comportamiento del lixiviado de la escoria de SiMn en función del pH, siendo predominante un aumento de la lixiviación de la mayoría de los metales cuanto más ácido es el medio.

En cuanto a los estudios que analizan el uso de la escoria como materia prima para la fabricación de productos de la construcción, éstos indican que el comportamiento de liberación del cemento con adición de escoria de SiMn es similar al que presenta el cemento común, por lo que se podría considerar que, de manera similar a las escorias de acero, no se prevé la generación de impactos adversos al medio ambiente y a la salud humana cuando la escoria de SiMn se emplee en aplicaciones ligadas o embebida en una matriz como el cemento.

La escoria de cobre tiene un gran contenido de hierro y sílice procedente de sus componentes principales. También se evidencian concentraciones notables de cobre, zinc y aluminio y, en menor medida, de arsénico y plomo. Según los resultados analíticos de los ensayos de columna, ciertos parámetros como cobre, molibdeno y antimonio presentan una capacidad de lixiviación que podría, en algún caso, ser superior a los valores límite considerados como referencia, por lo que sería necesario establecer un control y seguimiento de estos.

Teniendo en cuenta el escenario de aplicación no ligada, correspondiente a su empleo como árido para el relleno en zanjas de tubería (en el que existe una cierta probabilidad de fuga o rotura que podría incrementar el riesgo de lixiviación al entrar en contacto con agua), así como su consideración en otros EEMM, como Flandes, en el que el uso de la escoria de cobre en rellenos es minoritario frente a su empleo en aplicaciones ligadas, el uso de las escorias de cobre como árido para el relleno de zanjas para la instalación de tuberías no se puede considerar seguro.

En cuanto al uso como material abrasivo, según ciertos documentos la utilización de la escoria de cobre puede romper las estructuras de vidrio del silicato provocando la liberación de metales pesados como arsénico, cromo y plomo, pudiendo superar los límites de exposición dictados por la OSHA. Por ello, se considera imperativo la necesidad de implantar un sistema de gestión de seguridad y salud que controle los posibles riesgos y reduzca la posible afección a la salud humana y al medio ambiente durante las actividades de abrasión con escoria de cobre.

En cuanto al uso de la escoria de cobre como materia prima en la fabricación de clínker, cabe esperar que los posibles impactos ambientales y a la salud humana derivados del uso de la escoria sean notablemente inferiores a los que cabría esperar en aplicaciones no ligadas, debido al encapsulamiento de la escoria en la matriz cementante. Según la información facilitada, ciertos elementos incrementan su presencia en el clínker fabricado con silicato de hierro (escoria de cobre) respecto a un clínker fabricado sin escoria, especialmente el molibdeno, el circonio o el cobre, aunque la mayoría de los compuestos se encuentran en el mismo orden de magnitud.

La información recopilada en el presente estudio permite relacionar los criterios que deben ser tenidos en cuenta para el establecimiento del fin de condición de residuo para las escorias de fundición de horno de

arco eléctrico (acero al carbono, cobre y silicomanganeso) para su uso como material de la construcción en diversas aplicaciones, tras haber sufrido un proceso adecuado de tratamiento.

Es por ello que se está en condiciones de definir los requisitos y criterios que deben cumplir las escorias tratadas, así como procedimientos para el control de dicho cumplimiento, cuando se utilizan como árido en aplicaciones ligadas y no ligadas, y como materia prima en la fabricación de productos de la construcción.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

*Acceptability of Alternative Materials in Road Construction. Environmental Assessment. Francia 2011.*

*Aggregate from waste steel slag: quality protocol. Reino Unido 2015.*

*Alicia Moral Santa-Olalla. Exigencias Ambientales que Deberán Satisfacer los Áridos Derivados de Residuos en Distintas etapas de su Ciclo de Vida. CEDEX. Congreso Nacional de Medio Ambiente. CONAMA 2012.*

*A. Hidalgo y C. Alonso. Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). 2005.*

*Antonio Sánchez Trujillano, Laura Parra Ruiz, Julio Termenón Delgado. Caracterización del comportamiento ambiental de áridos procedentes del reciclado de las escorias de acería de horno eléctrico para su empleo en construcción de carreteras 2018. Electric Arc Furnace Slags Aggregates Environmental Performance in Road Construction. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/1387/1356>*

*Asociación de Empresas Productoras de Acero y de Productos de Primera Transformación del Acero de España. UNESID.*

*A. Méndez. Proyecto sobre Residuos: Utilización de Escorias como Sustitutos de Áridos. Máster Profesional e Ingeniería y Gestión Medioambiental. Escuela de Organización Industrial. 2010-2011.*

*Comisión Europea. Mercado CE de los productos de construcción paso a paso. 2015.*

*Decisión del Consejo, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al Anexo II de la Directiva 1999/31/CEE*

*Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre la valorización de escorias siderúrgicas.*

*Decreto 100/2018, de 20 de diciembre, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria*

*Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco.*

*Decreto 64/2019, de 9 de abril, del régimen jurídico aplicable a las actividades de valorización de escorias negras procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico.*

*Decreto de Calidad del Suelo Holandés (Soil Quality Decree (SQD)). 2008.*

*Decreto sobre Materiales Substitutivos de Construcción, por el que se modifica el Decreto Federal de Protección del Suelo y Suelos Contaminados y el Decreto de Vertederos y la Ordenanza de Residuos Comerciales. Alemania 2017.*

*Directiva 98/83/CE del Consejo, de 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.*

*Directiva Marco de Residuos (DMR) 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos.*

*Directiva 2003/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de junio, por la que se modifica por vigesimosexta vez la Directiva 76/769/CEE del Consejo respecto a la limitación de la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos (nonilfenol, etoxilatos de nonilfenol y cemento).*

*Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación).*

*EMGRISA. Análisis de la Situación Actual de la Gestión de Escorias del Sector Siderúrgico en la UE y en España y Evaluación del Cumplimiento de los Requisitos para ser Considerado Subproducto o Desclasificado como Residuo. 2015.*

*European Chemicals Agency (ECHA). Documento de orientación sobre residuos y sustancias recuperadas. Versión 2. 2010.*

*European Commission. End of Waste -Aggregates Case Study. Working document. 2007.*

*European Commission. 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. 2014.*

*European Commission. Commission Staff Working Document EU Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance. 2016.*

*European Commission. Study to Assess Member States (MS) Practices on By-Product (BP) and End-of-Waste (EoW). 2020.*

*European Commission. Study to support the preparation of Commission Guidelines on the definition of backfilling. 2020.*

*European Commission. Harmonized Standards. <https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/>*

*EUROSLAG - The European Slag Association.*

*Guía de Aplicación del Decreto de Actividades de Valorización de Escorias Negras de Fabricación de Acero en Hornos de Arco Eléctrico y su Utilización como Árido Siderúrgico. 2019.*

*Guide Sétra d'application. Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière. Les laitiers sidérurgiques. Francia 2012.*

*Guide SETRA. Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière- Évaluation environnementale. 2011. Francia 2011.*

*H.A. van der Sloot and J.J. Dijkstra. Development of horizontally Standardized leaching tests for construction materials: A material based or release based approach? Identical leaching mechanisms for different materials. ECN-C--04-060, ECN 2004*

*Karmele Otegi Aldai. Estudio del impacto ambiental por lixiviación de la escoria de acería en capas granulares no ligadas 706-TFM-314. Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña. 2012.*

*Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.*

*Ley 4/2015, de 25 de junio, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo.*

*Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). Sistema Español de Inventario de Emisiones. Metodologías de estimación de emisiones. Hornos eléctricos de acerías. Sin fecha.*

*Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Instrucción sobre criterios para la puesta en práctica del mercado CE de los áridos. 2004*

*Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Instrucción sobre los criterios para la puesta en práctica del mercado CE de los morteros para albañilería. 2016.*

*Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. Guía sobre criterios para la puesta en práctica del mercado CE de cementos. 2016.*

*OVAM. Gebruiksmogelijkheden van grondstoffen volgens VLAREMA in of als bouwstof- een stand van zaken. Flandes 2014.*

*OFEV. Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués. Suiza 2017.*

*Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio, por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal.*

*Orden FOM/1269/2006, de 17 de abril, por la que se aprueban los Capítulos: 6.-Balasto y 7.-Subbalasto del pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios (PF).*

*Orden FOM/1382/2002, de 16 mayo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes relativos a la construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones.*

*Orden PRE/1954/2004, de 22 de junio, por la que se modifica el Anexo I del Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre, por el que se imponen limitaciones a la comercialización y al uso de ciertas sustancias y preparados peligrosos.*

*Orden PRE/3796/2006, de 11 de diciembre, por la que se modifican las referencias a normas UNE que figuran en el anexo al Real Decreto 1313/1988, de 28 de octubre.*

*Plan de Prevención y Gestión de Residuos de la Comunidad Autónoma del País Vasco/2020 «Hacia una economía circular». 2015.*

*Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).*

*Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios (PF).*

*Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.*

*Real Decreto 817/2015, 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.*



*Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08).*

*Real Decreto 163/2019, de 22 de marzo, por el que se aprueba la Instrucción Técnica para la realización del control de producción de los hormigones fabricados en central.*

*Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16).*

*Real Decreto 1313/1988, de 28 de octubre, por el que se declara obligatoria la homologación de los cementos para la fabricación de hormigones y morteros para todo tipo de obras y productos prefabricados.*

*Regione Lombardia. Osservatorio per l'Economia Circolare e la Transizione Energética. Tavolo scorie di fusione. Scoria nera da forno elettrico EAF-C. 2020.*

*Reglamento (CE) 1907/2006 relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).*

*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 y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo.*

*Reglamento (UE) nº 333/2011 del Consejo, de 31 de marzo, por el que se establecen criterios para determinar cuándo determinados tipos de chatarra dejan de ser residuos con arreglo a la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.*

*Reglamento (CE) Nº 765/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de julio, por el que se establecen los requisitos de acreditación y vigilancia del mercado relativos a la comercialización de los productos y por el que se deroga el Reglamento (CEE) nº 339/93.*

*Reglamento VLAREMA sobre la gestión sostenible de los ciclos de materiales y residuos, de 17 de febrero de 2012. Flandes.*

*Yasutaka T, Naka A, Sakanakura H, et al. Reproducibility of up-flow column percolation tests for contaminated soils. PLoS One. 2017. doi: 10.1371/journal.pone.0178979*

## **Escoria Negra**

*ASTM C33-3. Standard Specification for Concrete Aggregates.*

*Adriana Estokova, Lenka Palascakova, Maria Kanuchova. Study on Cr(VI) Leaching from Cement and Cement Composites. 2018.*

*A. Eštoková, L. Palaščíková, E. Singovszkáb, M. Holub. Analysis of the chromium concentrations in cement materials. 2012*

*A. Fernández Ruiz. Estudi Preliminar de Lús D.Arids Siderúrgicos com Last per als Molins de Vent. Escuela de Caminos. Universidad Politécnica de Cataluña. Febrero 2015.*

*Alicia Moral Santa-Olalla. Exigencias Ambientales que Deberán Satisfacer los Áridos Derivados de Residuos en Distintas etapas de su Ciclo de Vida. CEDEX. Congreso Nacional de Medio Ambiente. CONAMA 2012.*

*A. Landaberea. Estado del Conocimiento sobre la Viabilidad del Uso de Escorias de Acería Eléctrica en Hormigones Compactados a Rodillo. Trabajo Fin de Máster. Escuela de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco. 2018.*

*A. Méndez. Proyecto sobre Residuos: Utilización de Escorias como Sustitutos de Áridos. Máster Profesional e Ingeniería y Gestión Medioambiental. Escuela de Organización Industrial. 2010-2011.*

*Cátedra de Ingeniería Rural. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Sin fecha.*

*CEDEX. Ficha Técnica: Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico. 2013.*

*Departamento de Ordenación del Territorio Vivienda y Medio Ambiente. Gobierno Vasco. Libro Blanco Para la Minimización de Residuos y Emisiones. Escorias de Acerías. 1999.*

*Decisión de Ejecución de la Comisión, de 28 de febrero de 2012, por la que se establecen las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) en la producción siderúrgica conforme a la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre las emisiones industriales.*

*Documento BREF. Mejores Técnicas Disponibles de Referencia Europea. Forja y Fundición. 2009.*

*Estudio de investigación de morteros con sustitución de escorias siderúrgicas utilizados en el revestimiento interior de tubos de fundición. Estudio Fin de Grado Universidad de Cantabria. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energías. 2017.*

*Fundación Tecnalia Research & Innovation. Guía de Criterios Actualizados para el Empleo de Escoria Negra de Acería de Horno Eléctrico de Arco (HEA), de Acería LD, y de Horno Alto, como Árido para Capas Granulares y Pavimentos de Hormigón en la Construcción de Carreteras. 2018.*

*European Commission. Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel. 2001.*

*Gain: Escorias en Capas de Asiento Ferroviarias. LIFE12 ENV/ES/000638. Informe de Layman. 2014.*

*Guía de Criterios Actualizados para el Empleo de Escoria Negra de Acería de Horno Eléctrico de Arco (HEA), de Acería LD, y de Horno Alto, como Árido para Capas Granulares y Pavimentos de Hormigón en la Construcción de Carreteras. Fundación Tecnalia Research & Innovation. 2018.*

*Gobierno Vasco. Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco. 2012.*

*Gobierno Vasco. Guía de aplicación del decreto de actividades de valorización de escorias negras de fabricación de acero en hornos de arco eléctrico y su utilización como árido siderúrgico. 2019*

*Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). A. Hidalgo y C. Alonso. Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento. 2005.*

*IHOBE, Gobierno Vasco y Fondo Europeo de Desarrollo Regional. Iniciativas Empresariales de Economía Circular en el País Vasco. Descripción de 36 proyectos. Febrero 2017.*

*IHOBE. Libro Blanco para la Minimización de Residuos y Emisiones. Escorias de acería. 1999.*

*Influence of Ageing in the Assessment of Leaching Behaviour of Electric Arc Furnace Slags. Eingereicht an der Technischen Universität Wien. Paul H. Brunner. 2009.*

*Inventario Residuos No Peligrosos del País Vasco 2016. Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda. Abril 2018.*

*JRC Reference Report. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. 2013.*

*J. Roca Guitart. Interés Técnico-Económico del Uso de Escoria en el Ámbito Ferroviario. Escuela de Caminos. Universidad Politécnica de Cataluña. Octubre 2012.*

*Julio Vaquero García, Jose Manuel Blanco Segarra, Javier Payan de Tejada. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Gobierno de España. Nota Técnica NT 03/2020 sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Diciembre 2020.*

*M. Frías. Árido siderúrgico en hormigones: proceso de envejecimiento y su efecto en compuestos potencialmente expansivos. 2010.*

*M. Morata, C. Saborido & V. Fontsero. Slag Aggregates for Railway Track Bed Layers: Monitoring and Maintenance. 2016.*

*Paul H. Brunner. Influence of Ageing in the Assessment of Leaching Behaviour of Electric Arc Furnace Slags. Eingereicht an der Technischen Universität Wien. 2009.*

*The European Slag Association. EUROSLAG, EUROFER. Position Paper on the status of Ferrous Slag complying with the Waste Framework Directive 2008/98/CE (Articles 5/6) and the REACH Regulation. 2012.*

*Scoria nera da forno da arco elettrico (EAF) - Metodo per la preparazione del campione da sottoporre a prova di lisciviazione secondo la UNI EN 12457-2.*

*Umweltbundesamt (Agencia Federal de Medio Ambiente, Alemania). Heavy Metals in Cement and Concrete Resulting from the Co-incineration of Wastes in Cement Kilns with Regard to the Legitimacy of Waste Utilisation" Plan de investigación medioambiental del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la naturaleza y Seguridad Nuclear. 2003.*

*Valorisation des laiters d'acierie électrique (LAFE). Suiza 2018.*

### **Escoria Blanca**

*A. Méndez. Proyecto sobre Residuos: Utilización de Escorias como Sustitutos de Áridos. Máster Profesional e Ingeniería y Gestión Medioambiental. Escuela de Organización Industrial. 2010-2011.*

*CEDEX. Ficha Técnica: Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico. 2013.*

*European Commission. Reference Document on Best Available Techniques the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. May 2010.*

*E. García Avilés. Escorias Blancas de Acería como Material de Construcción. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2014.*

*Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco. "Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escoria de Acería". 1999.*

*J. Hernández Puy. Estudio de la Estabilidad Volumétrica, Propiedades Físicas y Químicas de la Escoria Negra de Acero de Horno de Arco Eléctrico. 2007.*

*Jordi Cañas Gallart. Universidad Politécnica de Catalunya. Estudio del Comportamiento de Hormigones con Áridos Siderúrgicos de Horno Eléctrico. 2012.*

*JRC Reference Report. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. 2013.*

*Karmele Otegi Aldai. Estudio del impacto ambiental por lixiviación de la escoria de acería en capas granulares no ligadas. Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. 2012.*

*María Eugenia Parrón-Rubio, Francisca Perez-García, Antonio Gonzalez-Herrera, Miguel José Oliveira and María Dolores Rubio-Cintas. Slag Substitution as a Cementing Material in Concrete: Mechanical, Physical and Environmental Properties. 2019.*

*M. Isabel Prieto Barrio, A. Rodríguez Saiz, A. Cobo Escamilla, J.M. Manso Villaláis. Estudio de la Corrosión de Armaduras Embebidas en Morteros Fabricados con Sustitución Parcial y Total de Áridos por Escorias Blancas de Horno Cuchara. V Congreso de ACHE. 2011.*

*M. Tossavainen. Characteristics of Steel Slag Under Different Cooling Conditions. Sweden. 2006.*

*Resolución de la Dirección General de Evaluación Ambiental, por la que se otorga la Autorización Ambiental Integrada a las instalaciones de la empresa CORRUGADOS GETAFE, S.L.U., ubicadas en el término municipal de Getafe. 2017.*

*Siderúrgica Sevillana S.A. <https://www.siderurgicasevillana.com/es/>*

*Setién, J., Hernández, D. y González, J.J. s.l. Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. Construction and Building Materials, 2008.*

*T. Herrero. Vázquez. Estudio del efecto de la Hidratación de la Escoria Blanca de Acería de HEA: Aplicación en pastas y morteros de cemento. Universidad del País Vasco. 2015.*

*V. Ortega López. Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales. Universidad de Burgos. 2011.*

### **Escoria de silicomanganeso**

*Abhay Vinayakrao Patil, Anant Manohar Pande. Behaviour of Silico Manganese Slag Manufactured Aggregate as Material for Road and Rail Track Construction. Advanced Materials Research Vols 255-260 (2011) pp 3258-3262 Online: 2011-05-31 (2011) Trans Tech Publications, Switzerland*

doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3258. *Civil Engineering, Yeshwantrao Chavan College of Engineering, Wanadongri, India. 2011.*

CEDEX. *Análisis de una muestra de escoria de silicomanganeso enfriada al aire. Convenio de aplicaciones en firmes de carretera de una escoria de silicomanganeso de Ferroatlántica S.L. 2003.*

Clément Houzé. *Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico manganése. Universidad de París. 2014.*

CSIC. *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Informe de resultados de la caracterización química (óxidos metálicos) de las escorias. 2011.*

Dutch List. *Circular de Remediación de Suelos de 2013, tabla 1, del Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente de Holanda.*

*Estudio de investigación de morteros con sustitución de escorias siderúrgicas utilizados en el revestimiento interior de tubos de fundición. Estudio Fin de Grado Universidad de Cantabria. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energías. 2017.*

Filipe Batista Ribeiro, Bruno Guida Gouveia, Filipe Almeida Corrêa do Nascimento, Felipe Dias Costa, Marcelino Aurélio Vieira da Silva. *Characterization of silicon-manganese iron slag for employment in base and sub-base layers for highway. Department of Transportation Engineering, COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil .2020.*

Gobierno Vasco. *Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco. 2012*

Green Engineering and Resources Group y Centro de Investigación del Medio Ambiente (CIMA). *Comportamiento Ambiental de las Escorias de Fundición, acería y ferroaleaciones para su valorización en diferentes aplicaciones. 2015.*

INERCO. *Caracterización Físico-Química y Ecotoxicológica de las Escorias de Silico-Manganeso Almacenadas en los Montones de la Escombrera Sur de las Instalaciones de Hidronitro Española, S.A. 2011.*

International Manganese Institute (IMNI). *Slags, silicomanganese manufacturing (SiMn slag). 2012.*

Hidronitro Española, S.A. *Análisis de caracterización de escorias. 1996.*

MINER. *Ministerio de Industria y Energía. Guías Tecnológicas. Directiva 96/61 Relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Epígrafe 2.5. Ferroaleaciones.*

Moisés Frías, M.<sup>a</sup> Isabel Sánchez de Rojas, Ignacio Menéndez. *Viabilidad de escorias de SiMn como árido de reciclado en hormigones. Ministerio de Educación y Ciencia. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 2004.*

Moisés Frías, M. Isabel Sánchez de Rojas, Ignacio Menéndez. *Comportamiento de cementos Portland con adiciones de escoria de SiMn. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 2005.*

Moisés Frías, M. Isabel Sánchez de Rojas. *Estudio de las propiedades químico y físico-mecánicas de matrices de cemento elaboradas con altos porcentajes de escorias de SiMn como adición activa*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 2004.

Rojas et Frías. *Uso integral de residuos en la fabricación de nuevos cementos. Parte 1*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732009000300001](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732009000300001).

*Viabilidad de escorias de SiMn como adición activa al cemento Portland*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 2004.

### **Escoria de cobre**

Aitana Díaz Suárez. *Economía Circular de los Residuos Siderúrgicos: Sustitución de Abrasivos Tradicionales*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Oviedo. 2017.

A. J. Vázquez Vaamonde, J. J. de Damborenea González. *Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, 2000.

Anna Potysz. *Copper Metallurgical slags: Mineralogy, bio/weathering processes and metal bioleaching*. PHD Thesis. Université Paris-Est. UNESCO-IHE. 2012-2015 PHD THESIS (2012-2015).

Atlantic Copper. <https://www.atlantic-copper.es/>

Beatriz Piedecausa García. Servando Chinchón Payá. Miguel Angel Morales Recio. Miguel Angel Sanjuán Barbudo. *Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte I. Radiación externa: índice de riesgo radiactivo*. Universidad de Alicante e IECA. 2013.

Besluit van de Vlaamse Regering tot vaststelling van het Vlaams reglement betreffende het duurzaam beheer van materiaalkringlopen en afvalstoffen. 17 Februari 2012.

Bipra Gorai, R.K. Jana, Premchand *Characteristics and Utilization of Copper Slag*. National Metallurgical Laboratory. 2002.

Carlos Cristóbal Hunt Recabarren. *Modelamiento del enfriamiento controlado de escorias de fusión de cobre*. Universidad de Chile. 2017.

C. Lavanya, A. Sreerama, N.Darga Kumar. *A review on utilization of copper slag in geotechnical applications*. *Proceedings of Indian Geotechnical Applications*. 2011. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). *Guía de Seguridad 11.2: Control de la exposición a fuentes naturales de radiación*. 2012. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). *Instrucción IS/05, de 26 de febrero de 2003, del Consejo de Seguridad Nuclear, por la que se definen los valores de exención para nucleidos según se establece en las tablas A y B del anexo I del Real Decreto 1936/1999*. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). *Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del Consejo*

*de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural.*

*Convenio de Basilea. Sistema de control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y otros desechos. Manual de Instrucciones. UNEP. Malasia 1998.*

*CYM Materiales S.A. Estudio comparativo de costo-rendimiento entre granalla de acero y escoria. Sin fecha.*

*Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimiento de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.*

*Department of Health and Human Services, "Evaluation of Substitute Materials for Silica Sand in Abrasive Blasting". Pittsburgh, Pennsylvania 1998.*

*Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom.*

*Documento BREF. Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales No Férreos. 2005.*

*European Commission. Directorate-General Environment. Report EUR 19264. J. Hofmann, R. Leicht, H.J. Wingender, J. Wörner. Nuclear Safety and the Environment. Natural Radionuclide Concentrations in Materials Processed in the Chemical Industry and the Related Radiological Impact. 2000.*

*Giovanni A. Juzga León, Reinaldo Villalba Rodríguez, Ronald Rueda Sarmiento. Sustitución de la arena en procesos de chorreado en seco para la limpieza de superficies metálicas. Colombia. 2009.*

*Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Panorama Minero 2017.*

*Instituto Europeo del Cobre. <https://copperalliance.es/sobre-nosotros/industria-cobre/>*

*Juan Carlos Sarmentero Regueira. Impacto de la Logística Inversa en el Mercado del Cobre en España. Universidad Politécnica de Cataluña. Trabajo Final del Máster en Ingeniería de Recursos Naturales. 2010.*

*K. Arun Kumar, Dr. A. Mahesh Babu. Characteristics and Utilization of Copper Slag-Fly Ash Mix as Road Construction Material. Department and Utilization of Copper Slag-fly Ash Mix as Road Construction Material. 2017.*

*L.E. García Medina, E. Orrantía Borunda, A. Aguilar Elguézaba. Uso de la Escoria de Cobre en el Proceso de Fabricación de Clínter para Cemento Portland. 2006.*

M. A. Sanjuán, J.A. Suárez y P.Mora. *Aplicación del silicato de hierro obtenido en el proceso industrial de la fundición de cobre. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Atlantic Copper, S.L.U., ETSI Minas y Energía UPM. 2018.*

M.I. Sánchez de Rojas, J. Riviera y M. Frías. *Escorias de cobre: comportamiento puzolánico y fijación de los elementos pesados en morteros. Instituto Eduardo Torroja (CSIC). 2004.*

Manuel Cruz Carrasco. *Universidad de Málaga. Tesis Doctoral "Estudio de la Resistencia y Reología de Hormigones con Adición de Escorias de Cobre como Sustituto del Árido Fino". Málaga, 2014.*

Mizerna, Kamila. *Mobility of heavy metals from metallurgical waste in the context of sustainable waste management, Economic and Environmental Studies (E&ES), ISSN 2081-8319, Opole University, Faculty of Economics, Opole, Vol. 16, Iss. 4, pp. 819-830. Polonia. 2016.*

Montana Tech of the University of Montana. *"Airborne Exposure to Heavy Metals and Total Particulate During Abrasive Blasting Using Copper Slag Abrasive". D. Stephenson, T. Spear, M. Seymour and L. Cashell. 2002.*

M. Najimi, J. Sobhani, A.R. Pourkhorshidi. *Durability of Cooper Slag Contained Concrete Exposed to Sulfate Attack. Building and Housing Research Center. 2010.*

OVAM. *Gebruiksmogelijkheden van grondstoffen volgens VLAREMA in of als bouwstof- een stand van zaken. Flandes. 2014.*

Occupational Safety and Health Administration (OSHA).  
[https://www.osha.gov/dts/maritime/standards/guidance/shipyard\\_guidance.html](https://www.osha.gov/dts/maritime/standards/guidance/shipyard_guidance.html)

Piedra Ibérica. <https://piedraiberica.com/wp-content/uploads/2015/03/07004.pdf>

Reglamento VLAREMA sobre la gestión sostenible de los ciclos de materiales y residuos, de 17 de febrero de 2012

Romy S. Edwin, Mieke de Shepper, Elke Gruyaert, Nele De Belie. *Effect of copper slag as supplementary cementitious material (SCM) in ultra high performance mortar. Faculty of Engineering, Halu Oleo University, Kendari, Indonesia. 2015.*

Valderrama, González, Santander & Zazzali. *Recuperación de Cobre Contenido en Escoria de Cobre Mediante Flotación. 2018.*

Yaichi Esteban Andrés Pérez Mejías. *Utilización de Escorias de Cobre de Codelco Ventanas como Agregado Pétreo para Tratamientos Superficiales Asfálticos Simples en la Región de Valparaíso. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso-Chile. Enero 2017.*



En Madrid, 23 de julio de 2021.

Elaborado por:

Revisado por:

Aprobado por:

**Christian Jiménez Guerra**

*Técnico de Proyecto  
Dirección de Operaciones y  
Tecnología*

**Ana Díaz Rodríguez**

*Jefe de Proyecto  
Dirección de Operaciones y  
Tecnología*

**Elena Fernández Arauzo**

*Gerente de Cuenta  
Dirección de Operaciones y  
Tecnología*

*En su compromiso de mejora del medio ambiente y al amparo del art.35 de la Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible, EMGRISA ha editado este documento minimizando los consumos de papel y tinta.*

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

## **ANEXO I. PROPUESTA DE CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO DE LAS ESCORIAS DE ACERO AL CARBONO**



## **Propuesta de criterios para el establecimiento del fin de condición de residuo de las escorias de acero al carbono**

En base a toda la información recopilada y analizada en este estudio, a continuación se realiza la siguiente propuesta sobre el contenido mínimo que debería incluirse de cara a un posible establecimiento del FcR en nuestro país de las escorias de acero al carbono de horno de arco eléctrico, escoria negra y escoria blanca, tras haber sido sometidas a un proceso de valorización para su uso como material de construcción en diversas aplicaciones, de manera que se garantice la protección del medio ambiente y la salud pública.

### **1. Residuos objeto de tratamiento de valorización**

Solo serán considerados como admisibles aquellos residuos generados en los centros de producción de acero al carbono por vía eléctrica: escorias negras procedentes del horno de arco eléctrico (metalurgia primaria o fusión) y escorias blancas procedentes del horno cuchara (metalurgia secundaria o afino).

El código LER asociado a este tipo de escorias es el *10 02 02* especificado a continuación:

*10. "Residuos de procesos térmicos".*

*10 02. " Residuos de la industria del hierro y del acero".*

*10 02 02. "Escorias no tratadas".*

### **2. Tratamiento de las escorias de acero al carbono**

La mayor parte de los inconvenientes asociados a la utilización de las escorias (riesgo de expansión, mayor densidad, absorción y, por tanto, mayor humedad) pueden atenuarse o eliminarse por completo adoptando las precauciones necesarias durante su producción (forma de enfriamiento y tratamiento), mediante un cuidadoso diseño de mezclas, o ajustando oportunamente los procedimientos de fabricación y puesta en obra.

#### Proceso de valorización

El proceso de valorización de las escorias constará de diversas etapas en función del tipo de escoria y su uso ulterior, de manera que se asegure el cumplimiento de los requisitos indicados en el propio FcR, así como el rendimiento mecánico, geotécnico y/o hidráulico necesario para cumplir las especificaciones técnicas del producto final.

Todas estas etapas deberán realizarse bien por el productor de las escorias o bien por un tercero, en los mismos centros de producción o en plantas externas, y deben tener en cuenta las MTD de cara a la protección del medio ambiente.

- Almacenamiento

Las escorias, una vez producidas, deberán almacenarse a la espera de tratamiento en condiciones adecuadas de higiene y seguridad, en los términos de los artículos 27 y 28 de la *Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados*.

Con objeto de evitar la contaminación de la escoria negra con otro tipo de materiales, se deberá asegurar la existencia de espacios de acopios de escorias suficientemente compartimentados, así como establecerse una separación física suficiente entre acopios que garanticen que la escoria blanca no entre en contacto con la escoria negra en ninguna de las fases del tratamiento.

- Estabilización (maduración o envejecimiento)

La estabilización de los compuestos potencialmente expansivos contenidos en las escorias de origen se deberá garantizar por medio de procesos de maduración o envejecimiento de forma previa a su acondicionamiento o sobre el material resultante una vez acondicionada la escoria.

Los procesos de maduración y envejecimiento pueden consistir en regado con agua (enfriamiento rápido), volteo y/o acopio del material al aire (enfriamiento moderado), mediante inmersión directamente en agua u otros procesos de carbonatación acelerada dirigidos a transformar los compuestos expansivos en carbonatos.

El período de estabilización de la escoria podrá variar en función del tipo de escoria, el proceso de enfriamiento, el objetivo de expansión deseable para una determinada aplicación y el procedimiento de envejecimiento adoptado.

Es recomendable que en esta etapa se evite la producción de lixiviados, priorizando el envejecimiento del material al aire. En cualquier caso, si el tratamiento implica la generación de lixiviados, los mismos deberán gestionarse o tratarse adecuadamente, evitando cualquier afección a los suelos y las aguas, superficiales o subterráneas.

El valor de expansividad debe garantizarse de acuerdo con lo especificado en la norma *UNE EN 1744- Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico* y en función de los requerimientos de cada uso<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Tal y como indica el *Decreto 64/2019, de 9 de abril* de País Vasco, la ficha técnica de escorias de acería del CEDEX, la Guía francesa "*Acceptability of Alternative Materials in Road Construction. Environmental Assessment*" o el protocolo "*Aggregate from waste steel slag: quality protocol*" de Reino Unido.

Para el control de la expansividad y otras propiedades, el *Decreto 100/2018, de 20 de diciembre*, de Cantabria, remite a los artículos 330, 510, 542 y 543 del PG-3, en función de la aplicación de la escoria.

Por último, la Nota Técnica NT 03/2020 del MITMA, indica controlar la expansión de las escorias para su uso en mezclas bituminosas de acuerdo con lo especificado en la norma *UNE-EN 13043:2003 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas*.

- Machaqueo, trituración o molienda

La escoria se triturará utilizando la tecnología de machaqueo que garantice tamaños adecuados de acuerdo con los requerimientos técnicos de cada uso, así como la mayor optimización en la eliminación de elementos metálicos embebidos en la escoria.

Los estudios facilitados subrayan la necesidad de esta etapa previa para obtener una granulometría similar a la de un árido convencional. Con este tratamiento, se puede conseguir un material con un huso granulométrico determinado y establecido en la normativa de aplicación correspondiente, tanto en aplicaciones ligadas como no ligadas.

- Desmetalización o desferretización

Con el objeto de recuperar el acero susceptible de ser reutilizado, prevenir daños en los equipos de trituración y mejorar la homogeneidad y calidad del árido siderúrgico, deberá realizarse un tratamiento de desferretización mediante procesos magnéticos, habitualmente realizado por medio de vehículos con electroimán y/o mesas densimétricas.

- Cribado y acopio

El material resultante se debe clasificar y acopiar atendiendo a fracciones granulométricas diferenciadas, en función del uso ulterior. Dichas fracciones granulométricas se acopiarán sobre superficie impermeable.

#### Requisitos de las instalaciones para el almacenamiento<sup>1</sup>

Las instalaciones de valorización de escorias de acero al carbono deberán disponer de una capa impermeable en aquellas zonas de almacenamiento de escorias sin tratar y en los acopios de escorias tratadas, así como un adecuado pavimento y diseño de pendientes en las zonas de almacenaje y tratamiento para conducir las aguas pluviales que pudieran arrastrar lixiviados.

Las instalaciones deberán disponer de un sistema de recogida de lixiviados y aguas pluviales para su control y posterior tratamiento, antes de su vertido final, de manera que estas aguas no lleguen al suelo ni a las aguas subterráneas y superficiales.

Las instalaciones deberán disponer de un adecuado sistema de tratamiento de los lixiviados y aguas recogidas, especialmente en la etapa de envejecimiento con riego, que permita el cumplimiento de los valores límite de emisión establecidos en la correspondiente autorización de vertido.

---

<sup>1</sup> Nota técnica MITMA NT/2020: La recomendación de disponer de una superficie pavimentada y con pendientes adecuadas en la zona de acopios es válida para cualquier tipo de árido: natural o artificial, dada la gran ventaja que supone evitar el empleo de áridos contaminados o sucios.

En caso de que el enfriamiento de la escoria tenga lugar sumergiéndolas directamente en agua, el efluente generado también deberá ser conducido a dicho sistema de tratamiento, junto con el resto de lixiviados y aguas recogidas.

Las instalaciones deberán disponer de elementos que impidan la mezcla de materiales tratados y no tratados, así como la mezcla de fracciones tratadas de escoria negra con fracciones tratadas de escoria blanca.

Los materiales pulverulentos deben confinarse en silos, en estructuras o en naves cerradas, o bien se han de localizar en una zona ubicada a sotavento y/o disponer de medidas antipolvo como mangas flexibles, preferentemente, o aspersores de agua.

Todo el entorno de la instalación deberá mantenerse adecuadamente de forma que la actividad de valorización no cause impactos adversos sobre el medio ambiente.

Los requisitos de la instalación, las operaciones básicas de la valorización de escorias y las medidas de control ambiental deberán ser acordes con lo establecido en el presente anexo, sin perjuicio del cumplimiento de todas las obligaciones establecidas en la normativa de residuos y suelos contaminados o, en su caso, de prevención y control integrados de la contaminación.

### 3. Requisitos técnicos de la escoria tratada

Para poder aplicar el FcR al material resultante producido (escoria tratada) esta deberá cumplir con:

- Los requisitos que se incluyen en las especificaciones y en normas técnicas que le sea de aplicación en función de su uso, de forma que pueda ser utilizado directamente para el fin atribuido.
- Las especificaciones adicionales que pudiera establecer el cliente en función de la aplicación final a la que vaya destinado.
- El potencial de lixiviación y el contenido total de determinadas sustancias en base a los requisitos que se establezcan como criterio FcR para garantizar la conformidad ambiental.

Para cualquiera de los posibles empleos contemplados en el PG-3 es preceptivo que la escoria tratada esté en posesión del mercado CE correspondiente. En la mayor parte de las aplicaciones reguladas en el PG-3, se exige que los áridos o materiales empleados **dispongan del mercado CE con un sistema de evaluación de la conformidad 2+**, para su incorporación en la correspondiente obra (artículo 5.b del Reglamento 305/2011, de 9 de marzo). De esta forma, se tendrá una garantía de que el material resultante del tratamiento cumple con las prescripciones técnicas necesarias para su uso como material de la construcción.

### 4. Usos permitidos de la escoria tratada

Los distintos usos en los que pueden emplearse las escorias de acería tratadas serían:

#### 1. Uso como árido

#### Escenarios de aplicación

En este caso, se pueden agrupar en dos escenarios de aplicación, aplicaciones ligadas y no ligadas:



- **Aplicaciones ligadas:** Uso de los materiales granulares mezclados con cualquier tipo de conglomerante que confiere cohesión al conjunto encapsulando los áridos dentro de una matriz inorgánica, donde su exposición al medio y la liberación de componentes podrían considerarse nulas o despreciables.
- **Aplicaciones no ligadas:** Uso de materiales granulares compactados en capas para la ejecución de diversas unidades de obra civil, sin que se adicione conglomerante alguno, abarcando dos escenarios posibles, que estarán asociados a la lixiviación del material y a las condiciones de uso (impermeabilización, bajo coberturas de materiales impermeables o no totalmente impermeables).

Se propone establecer dos escenarios de aplicación no ligada, en función de si la cobertura bajo la que se aplique la escoria tratada es totalmente impermeable o no lo es.

No obstante, el empleo de escorias de acero tratadas como material alternativo en **aplicaciones constructivas no ligadas**, puede representar una potencial afección al medio ambiente debido a la liberación de sus componentes al medio. Por ello, es necesario establecer una serie de **criterios y limitaciones de uso para este tipo de aplicaciones**, de manera que únicamente se permitan aquellos usos que garanticen tanto la calidad técnica de producto para una determinada aplicación, como la no generación de impactos adversos al medio ambiente y a la salud humana.

### Usos permitidos

De todos los posibles usos técnicamente viables de la escoria de acería, aquellos que por el tipo y condiciones de aplicación presentan un **menor riesgo potencial** de generar una afección al medio y que, por tanto, se permiten con **carácter general** desde el punto de vista ambiental, y siempre y cuando se garantice el cumplimiento de los requisitos y condiciones de uso establecidas en la norma FcR, son los siguientes:

- Aplicaciones ligadas
- Aplicaciones no ligadas bajo cobertura totalmente impermeable

El uso de las escorias tratadas para las **aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable o aplicaciones no ligadas que impliquen contacto directo con suelo** estará **condicionado al cumplimiento de las siguientes condiciones para garantizar la no generación de dichos impactos:**

- Limitaciones de espesor

Se propone limitar el uso de estas escorias en aplicaciones no ligadas con cobertura no totalmente impermeable a aquellas cuya norma de uso establezca **espesores limitados**, como es el caso de las capas de subbalasto. Los grandes espesores de escoria aumentan la cantidad de lixiviado que se genera y no se puede garantizar su no afección al medioambiente.

- Valores límite de contenido en el lixiviado

Para poder garantizar que durante el empleo de escorias tratadas en **aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable sin restricción de espesor** no se van a generar impactos adversos a la salud

humana y al medioambiente y, por tanto, se pueda permitir su uso, **el contenido máximo en el lixiviado deberá ser inferior a unos valores límite de lixiviación establecidos en base a un análisis cuantitativo de riesgos que, en ningún caso, podrán ser superiores a los valores límite de lixiviación establecidos para vertederos inertes.**

Dicho análisis de riesgos deberá contemplar un **escenario que pueda considerarse representativo** del empleo de la escoria tratada en este tipo de aplicaciones, que incluya al menos, la altura de aplicación, la capacidad de impermeabilización de la cobertura bajo la cual se va a aplicar la escoria, todas las vías de exposición, así como los potenciales receptores.

Hasta que se haya establecido una **metodología común** para llevar a cabo dicho análisis de riesgos, un procedimiento para la definición de los escenarios de aplicación de las escorias como material de la construcción bajo cobertura no totalmente impermeable, y un procedimiento para la validación de los análisis de riesgos realizados en base a dicha metodología por un órgano con capacidad suficiente, este tipo de aplicaciones estarán limitadas.

Los valores límite de lixiviación establecidos en las normas de valorización de las tres CCAA que han regulado el uso de las escorias tratadas, se corresponden con los fijados en la Decisión del Consejo de 19 de diciembre de 2002 para admisión de residuos inertes en vertederos. Sin embargo, estos valores no pueden considerarse representativos de un escenario de aplicación de las escorias como árido bajo cobertura no totalmente impermeable y sin restricción de espesor, al haber sido establecidos para un escenario diferente.

En concreto, estos valores límite han sido definidos para un escenario que, según la normativa de aplicación<sup>1</sup>, deberá estar diseñado para garantizar una estanqueidad y recogida eficaz de los lixiviados mediante la combinación de una barrera geológica y de un revestimiento artificial estanco bajo la masa de residuos, además de contar con medidas de control de contaminación tanto al suelo como a las aguas subterráneas y superficiales. Estas condiciones no se dan en ninguno de los usos propuestos para el uso de estas escorias tratadas.

Únicamente para aquellos usos que, por sus condiciones de aplicación, presentan un menor riesgo potencial de generar una afección al medio, como son las aplicaciones no ligadas bajo cobertura totalmente impermeable o aquellas bajo cobertura no totalmente impermeable con restricción de espesor (como en capas de subbalasto), se propone contemplar estos valores límite de lixiviación. **Estos usos se se referenciarán como “usos permitidos con menor riesgo ambiental”.**

No se considera necesario el establecimiento de valores límite para las escorias negras y blancas cuando son empleadas en aplicaciones ligadas o se encuentren formando parte de una matriz como materia prima

---

<sup>1</sup> Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

En el caso de las **aplicaciones no ligadas**, para cada uno de los tipos de usos permitidos, es decir, aquellos cuyo uso se permite por presentar un menor riesgo de generar una afección al medio y aquellos para los que se requieren una serie de condicionantes adicionales, por presentar mayor riesgo ambiental, se han establecido los siguientes valores límite:

**Anexo I. Tabla I. Valores límite de lixiviación para aplicaciones no ligadas (mg/kg).**

| Parámetro*              | Usos permitidos con menor riesgo ambiental | Usos permitidos con mayor riesgo ambiental                                  |
|-------------------------|--|---|
| Arsénico (As)           | 0,5  |   |
| <b>Bario (Ba)</b>       | 20   |   |
| Cadmio (Cd)             | 0,04                                       |   |
| <b>Cromo total (Cr)</b> | 0,5  |   |
| Cromo (VI)              | 0,1  |   |
| Cobre (Cu)              | 2  |   |
| <b>Mercurio (Hg)</b>    | 0,01                                       |   |
| <b>Molibdeno (Mo)</b>   | 0,5  |   |
| Níquel (Ni)             | 0,4  | Valores límite establecidos a partir de un análisis cuantitativo de riesgos |
| Plomo (Pb)              | 0,5  |   |
| Antimonio (Sb)          | 0,06                                       |   |
| <b>Selenio (Se)</b>     | 0,1  |   |
| Zinc (Zn)               | 4  |   |
| <b>Vanadio (V)</b>      | 1,5  |   |
| Cloruros                | 800  |   |
| <b>Fluoruros</b>        | 18   |   |
| Sulfatos                | 1.000                                      |   |

\* *En negrita aquellos elementos citados en los distintos estudios sobre comportamiento ambiental que son importantes controlar en la escoria negra. Hg, Mo, Se y Fluoruro: alguna muestra superó los valores de referencia. V, Ba y Cr: elementos que la bibliografía considera prestar atención.*

En ambos casos, el control de la lixiviación de las escorias tratadas se llevará a cabo mediante un ensayo de volteo según la norma UNE-EN-12457-4, que deberá ser realizado por laboratorio acreditado en todos los parámetros, comprobándose la no superación de los valores límite establecidos en la tabla anterior, no pudiéndose ajustar estos valores mediante adición o mezcla con otros materiales.

En el Anexo V se realiza una propuesta sobre los métodos de ensayo normalizados para la determinación de cada uno de los parámetros a controlar expuestos en las tablas anteriores.

El seguimiento del cumplimiento de estos parámetros se realizará a través de análisis periódicos cuya frecuencia se muestra a continuación:

**Anexo I. Tabla II. Frecuencia de muestreo y control de la producción.**

| Producción anual | N.º muestras | Frecuencia |
|------------------|--------------|------------|
| <30.000 t/año    | 1            | 3 meses *  |
| >30.000 t/año    | 1            | 1 mes **   |

\* Si se obtienen resultados conformes a lo dispuesto durante doce muestras consecutivas, la frecuencia de muestreo se reducirá a una muestra al semestre siempre y cuando se mantengan dichos resultados positivos. En caso contrario, se retornará a la frecuencia original.

\*\* Si se obtienen resultados conformes a lo dispuesto durante doce muestras consecutivas, la frecuencia de muestro se reducirá a una muestra al trimestre siempre y cuando se mantengan dichos resultados en positivo. En caso contrario, se retornará a la frecuencia original.

Por otra parte, al menos una vez al año, se deberá llevar a cabo un ensayo de lixiviación en columna de flujo ascendente, de acuerdo con la especificación técnica PNE-prEN 16637-3<sup>1</sup> Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Part 3: Horizontal up-flow percolation test, comprobándose la no superación de los valores límite establecidos en la siguiente tabla:

**Anexo I. Tabla III. Valores límite de lixiviación del material resultante para aplicaciones no ligadas conforme a la norma PNE-prEN 16637-3 (mg/kg).**

| Parámetro               | Valores limite |
|-------------------------|----------------|
| Arsénico (As)           | 0,8            |
| <b>Bario (Ba)</b>       | 22             |
| Cadmio (Cd)             | 0,03           |
| <b>Cromo total (Cr)</b> | 0,5            |
| Cromo (VI)              | 0,1            |
| Cobre (Cu)              | 0,5            |
| <b>Mercurio (Hg)</b>    | 0,02           |
| <b>Molibdeno (Mo)</b>   | 1              |
| Níquel (Ni)             | 0,44           |
| Plomo (Pb)              | 1,3            |
| Antimonio (Sb)          | 0,32           |
| <b>Selenio (Se)</b>     | 0,15           |
| Zinc (Zn)               | 2,8            |
| <b>Vanadio (V)</b>      | 1,8            |
| Cloruros                | 616            |
| <b>Fluoruros</b>        | 55             |

<sup>1</sup> En la actualidad esta norma se encuentra en tramitación. Una vez que se publique la norma definitiva y haya constancia de la existencia de laboratorios acreditados en dicha norma, será obligatorio que este ensayo se realice por laboratorio acreditado en todos los parámetros.

| Parámetro | Valores límite |
|-----------|----------------|
| Sulfatos  | 2.430          |

- Valores límite de contenido total

Para **aquellas aplicaciones no ligadas que impliquen contacto directo con suelo**, únicamente se podrá garantizar la no generación de impactos adversos a la salud humana y al medio ambiente mediante el cumplimiento de valores límite de contenido total, que estén basados en criterios de protección del suelo.

Como valores límite de contenido total se considera adecuado contemplar los niveles genéricos de referencia (NGR)<sup>1</sup> establecidos en suelos, dado que, en ningún caso, se debería admitir aplicar un material al suelo con unas concentraciones totales de contaminantes superiores a las que podrían representar un riesgo para la salud humana o el medio ambiente en términos de contaminación del suelo.

Aplicando el principio de precaución y teniendo en cuenta el criterio contemplado en la norma de valorización de escorias de acería del País Vasco, se propone considerar los valores de referencia establecidos para la categoría “otros usos”, que es la más restrictiva de todas las categorías de suelo establecidas en la normativa de protección de suelos tanto a nivel nacional como autonómico: uso industrial, uso urbano y otros usos.

No obstante, cabe señalar que, así como a nivel nacional se han determinado los NGR para compuestos orgánicos, los de los metales pesados se han establecido a nivel individual por las CCAA, teniendo en cuenta los valores de fondo específicos de cada CA, así como los usos del suelo y la ordenación del territorio en cada comunidad. Es por ello que no es factible poder establecer un **marco común a nivel nacional** relativo al establecimiento de valores límite de contenido total en las escorias tratadas, que garantizaría la no generación de impactos adversos a la salud humana y al medio ambiente para las aplicaciones que implican un contacto directo con el suelo.

Debido a la imposibilidad de poder establecer un marco común **a nivel nacional** para el establecimiento de valores límite de contenido total, el uso de la escoria tratada en aquellas aplicaciones no ligadas que impliquen contacto directo con suelo (tanto bajo cobertura totalmente impermeable como no totalmente impermeable) únicamente será posible **en aquellas CCAA en las que se hayan definido niveles genéricos de referencia para la categoría de suelo “otros usos”**, y siempre que las concentraciones de contenido total presente en las escorias tratadas no sean superiores a dichos NGR.

---

<sup>1</sup> **Nivel genérico de referencia (NGR):** Concentración de una sustancia contaminante en el suelo que no conlleva un riesgo superior al máximo aceptable para la salud humana o los ecosistemas, calculada de acuerdo con los criterios recogidos en el anexo VII del Real Decreto 9/2005, 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.

En caso de que las CCAA, decidan establecer valores límite de contenido total distintos a los NGR para la categoría “otros” usos para uno o varios parámetros, deberán justificar el motivo de su modificación, garantizando, en todo caso, una adecuada protección del suelo.

## **2. Otros usos: uso como materia prima en la fabricación de productos de construcción**

### **Usos permitidos**

La escoria negra y blanca se consideran adecuadas con carácter general para su empleo como materia prima en la fabricación de clínker. No se considera necesario el establecimiento de condicionantes de carácter técnico ni ambiental.

En la tabla adjunta al final de este anexo, se resumen los distintos escenarios de aplicación considerados y los posibles destinos de la escoria tratada contemplados en cada uno, para los dos tipos de usos permitidos: aquellos cuyo uso se permite con carácter general por presentar un menor riesgo de generar una afección al medio y aquellos para los que se requieren una serie de condicionantes adicionales, por presentar mayor riesgo ambiental.

## **5. Condiciones y restricciones de uso**

### **Condiciones de carácter técnico**

Con carácter general, queda expresamente prohibida la mezcla de escorias negras y blancas para su empleo como material granular en cualquiera de los elementos que constituyen la estructura de un firme de carreteras. La detección de la presencia de escoria blanca en cualquier lote suministrado a la obra debe suponer el rechazo de todo el material de la misma procedencia, así como del suministrador de este material.

Para los distintos destinos de la escoria tratada en función del escenario de aplicación contemplado, se proponen una serie de condiciones de carácter técnico (en función de las limitaciones a su viabilidad técnica) y condiciones de uso (basadas en las propuestas recogidas en la *Guía de Aplicación del Decreto de Actividades de Valorización de Escorias Negras de Fabricación de Acero en Hornos de Arco Eléctrico y su Utilización como Árido Siderúrgico*<sup>1</sup>) que se pueden consultar en la tabla final del presente anexo.

### **Condiciones de carácter ambiental**

Para cada uno de los escenarios de aplicación contemplados, se propone el cumplimiento de una serie de requisitos de carácter ambiental (véase tabla al final del presente anexo).

Como condicionante ambiental no se contempla establecer un espesor máximo de aplicación de la escoria tratada, ya que éste vendrá limitado por las especificaciones técnicas para cada aplicación específica.

---

<sup>1</sup> *Guía de Aplicación del Decreto de Actividades de Valorización de Escorias Negras de Fabricación de Acero en Hornos de Arco Eléctrico y su Utilización como Árido Siderúrgico. 2019*

Por otra parte, se propone establecer las siguientes restricciones de uso relativas a la protección de las aguas subterráneas y/o superficiales:

- No se utilizarán en espacios que presenten alguna figura de protección especial contemplada en la normativa sobre la conservación de la naturaleza.
- No se utilizarán en aquellos usos en los que se encuentren en contacto con el agua (como aplicaciones drenantes), así como en zonas inundables o en aquellas zonas comprendidas dentro de los perímetros de protección de acuíferos.
- No se utilizarán en usos en los que se emplacen sin cobertura alguna, tales como pistas forestales, caminos rurales no asfaltados ni hormigonados o balastos ferroviarios.

..

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*



Anexo I. Tabla IV. Usos permitidos, condiciones técnicas, condiciones de uso y condiciones ambientales de la escoria de acero

| Escorias de acería         |                         |  |                                     |  |  |                 |
|----------------------------|-------------------------|--|-------------------------------------|--|--|-----------------|
| Usos permitidos            | Escenario de aplicación | Destinos   | Condiciones técnicas <sup>1</sup>   | Condiciones de uso   | Condiciones de carácter ambiental  |                 |
| Con menor riesgo ambiental | ESCORIA BLANCA          | Como materia prima en la fabricación de productos de la construcción | Fabricación de clínker en cementera | Control contenido en fluoruros, según requisitos planta cementera.<br>Control expansividad: <5% MgO.<br>Granulometría uniforme <50 mm. | Dosificaciones por lo general de hasta 5% de escoria blanca pudiendo alcanzar un máximo de un 15%. | No se requieren |
|                            | ESCORIA NEGRA           | Como materia prima en la fabricación de productos de la construcción | Fabricación de clínker en cementera | -  | -  | No se requieren |
|                            |                         | Como árido en aplicaciones ligadas                                   | Morteros                            | Granulometría: Puede ser necesario adicionar finos o una adecuada molienda   | -  | No se requieren |
|                            |                         |  | Mezclas bituminosas                 | Granulometría: Puede ser necesario adicionar finos.<br>Hinchariento < 0,5%.<br>Según nota MITMA NT 03/2020 debe controlarse:           | -  | No se requieren |

<sup>1</sup> Todas las condiciones establecidas deben entenderse sin perjuicio de lo que establezca la normativa específica vigente en cada caso concreto, así como lo que establezca el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto que corresponda.

| Escorias de acería |   |   |   |   |                                   |
|--------------------|---|---|---|---|-----------------------------------|
| Usos permitidos    | Escenario de aplicación   | Destinos  | Condiciones técnicas <sup>1</sup>   | Condiciones de uso  | Condiciones de carácter ambiental |
|                    |   |   | <p>Expansión &lt;3,5% en volumen (UNE EN 13043<sup>1</sup>).</p> <p>Densidad aparente &lt;10% (&lt;7,5% en la mezcla).</p> <p>Informar sobre densidad relativa y absorción (UNE-EN 1097-6<sup>2</sup>).</p> |   |                                   |
|                    |   | <p>Fabricación de hormigón</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Hormigón estructural</li> <li>Hormigón no estructural Hormigón para carreteras</li> </ul>           | <p>Granulometría:<br/>Puede ser necesario adicionar árido fino.</p> <p>Quedan excluidas las aplicaciones en hormigones de resistencia superior a 60 N/mm<sup>2</sup> y hormigones pretensados.</p>          | No se requieren   |                                   |
| ESCORIA NEGRA      | Como árido en aplicaciones no ligadas bajo cobertura totalmente impermeable | <p>Zahorra para construcción de firmes de carreteras:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>En construcción de firmes (base, subbase, explanada mejorada)</li> </ul> |   | No se emplearán en zonas confinadas, como bases o subbases limitadas por bordillos. Las capas en las que se utilicen se deben drenar adecuadamente, evitando el estancamiento |                                   |

<sup>1</sup> UNE-EN 13043:2003 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.

<sup>2</sup> UNE-EN 1097 (1-10):2011 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos

| Escorias de acería |                         |   |  |  |  |
|--------------------|-------------------------|---|--|--|--|
| Usos permitidos    | Escenario de aplicación | Destinos  | Condiciones técnicas <sup>1</sup>  | Condiciones de uso   | Condiciones de carácter ambiental  |
|                    |                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Como material granular para base/subbase de vías peatonales, ciclistas y pistas deportivas</li> <li>Como material para explanada mejorada</li> </ul> | Expansividad <5% (UNE-EN 1744-1 <sup>1</sup> )<br>Índice granulométrico de envejecimiento <1% (NLT-361)<br>Cal libre < 5‰<br>Hinchamiento < 0,5% | de agua. Irán localizadas en la capa estructural del firme de carreteras (capa base y/o subbase) sobre la explanada y bajo el pavimento que garantizará una cobertura de alta impermeabilización.<br>Los rellenos se localizarán bajo aceras, soleras, firmes de carretera u otros tipos de coberturas que aseguren una alta impermeabilización. | <ul style="list-style-type: none"> <li>Valores límite de lixiviación de admisión de residuos inertes en vertederos (salvo fluoruros)</li> <li>Aplicación de la escoria tratada bajo una capa impermeable, garantizando al menos una tasa de infiltración de agua inferior a 6 mm/año.</li> <li>En caso de que se localicen sobre terreno natural deberán cumplir los valores límite de contenido total establecidos (NGR categoría otros usos de cada CCAA)</li> </ul> |
|                    |                         | Rellenos localizados bajo cobertura totalmente impermeable  |  | Irán situados bajo la capa de explanada o de firme. Podrán utilizarse en las zonas de coronación y núcleo por estar bajo coberturas de alta impermeabilización. No podrán utilizarse en zonas expuestas de talud (espaldones) incluso cuando tengan  |  |
|                    |                         | Zahorra para: terraplenes. Únicamente podrán emplearse en núcleo y coronación   | Expansividad <5% (UNE-EN 1744-1 <sup>2</sup> )<br>Índice granulométrico de envejecimiento <1% (NLT-361)<br>Cal libre < 5‰<br>Hinchamiento < 0,5% |  |  |

<sup>1</sup> UNE-EN 1744 (1-3):2010+A1:2013 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos

<sup>2</sup> UNE-EN 1744 (1-3):2010+A1:2013 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos

| Escorias de acería |                         |   |  |   |   |   |
|--------------------|-------------------------|---|--|---|---|---|
| Usos permitidos    | Escenario de aplicación | Destinos  | Condiciones técnicas <sup>1</sup>  | Condiciones de uso  | Condiciones de carácter ambiental   |   |
|                    |                         |   |  | coberturas de tierra natural, ni tampoco en la cimentación. |   |   |
|                    | ESCORIA NEGRA           | Como árido en aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable, en el que, por condicionantes de carácter constructivo, se garantiza una limitación máxima de espesor | Sub-balasto de vías férreas  | Granulometría: Puede ser necesario adicionar finos.         | Se dispondrá entre la capa de forma de la vía férrea y la capa de balasto que corona la vía.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Valores límite de lixiviación de admisión de residuos inertes en vertederos (salvo fluoruros)</li> <li>Se podrán emplear cuando se asegure cierta limitación de infiltración, bien por el propio tipo de material, bien mediante la adopción de medidas complementarias</li> </ul> |
|                    | ESCORIA NEGRA           | Como árido en vertederos  | Capa para el sellado de vertederos y pistas provisionales en su interior durante la explotación del mismo y, en general, en cualquier aplicación siempre que se realice dentro de la zona de impermeabilización del vaso de vertido. | -   | Los rellenos podrán ir situados en la capa de regularización, directamente sobre el vertido de residuos y bajo las diferentes capas que garantizan la impermeabilización parcial o total del vertedero. | Valores límite de lixiviación de admisión para el tipo de vertedero en cuestión   |

| Escorias de acería         |                         |  |  |  |   |
|----------------------------|-------------------------|--|--|--|---|
| Usos permitidos            | Escenario de aplicación | Destinos   | Condiciones técnicas <sup>1</sup>  | Condiciones de uso   | Condiciones de carácter ambiental   |
|                            |                         |  |  | Como material constructivo se usará siempre que se trate dentro de la zona de impermeabilización del vaso de vertido.  |   |
| Con mayor riesgo ambiental | ESCORIA NEGRA           | Como árido en aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable sin restricción de espesor y sin contacto directo con suelo | <ul style="list-style-type: none"> <li>Zonas expuestas de talud (espaldones) y cimentación en terraplenes</li> <li>Rellenos localizados o asimilables a terraplén (relleno en trasdós de obra de fábrica y en trasdós de muro de contención, nivelación de terrenos).</li> </ul> | <p>Zonas expuestas de talud: Se asegurará una cierta limitación de infiltración, bien por el propio tipo de material, bien mediante la adopción de medidas complementarias. En el caso de terrenos de nivelación, se adoptarán las mismas consideraciones.</p> <p>Rellenos localizados: carecerán de cualquier tipo de misión drenante. Se interpondrá una capa de material granular compactado sobre el relleno de escoria tratada a modo de "semi" barrera para limitar la infiltración.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Valores límite de lixiviación establecidos en base a un análisis cuantitativo de riesgos.</li> <li>Valores límite de lixiviación establecidos en base a un análisis cuantitativo de riesgos.</li> <li>En caso de contacto directo con el suelo. Valores límite de contenido total (NGR categoría otros usos de cada CA)</li> </ul> |
|                            | ESCORIA NEGRA           | Como árido en aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable sin restricción de espesor y con contacto directo con suelo |  |  |   |

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

## 6. Plan de muestreo y toma de muestras

La caracterización de la escoria tratada, tanto en lo relativo a las propiedades técnicas que habrá de cumplir en función de la aplicación final a la que vaya destinado (control de la calidad), como en lo relativo a la protección ambiental, deberá llevarse a cabo conforme a un plan de muestreo que permita obtener una muestra representativa del lote muestreado.

En el caso de que se fabriquen diferentes materiales alternativos (gama completa de cortes de áridos: arena, grava, etc.) a partir de un mismo lote (mensual, trimestral o semestral) de escoria bruta, el fabricante realizará el control de conformidad sobre el corte cuya granulometría corresponda a la fracción más fina comercializada.

Este plan de muestreo podrá ser diseñado de acuerdo con lo dispuesto en las siguientes normas.

### Anexo I. Tabla VII. Normas o estándares recomendados para la toma de muestras

| Producción anual  | Objeto                                 |
|---|--|
| UNE-EN 932-1:1997. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo.                                 | Toma de muestras                       |
| UNE-EN 932-2:1999. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio. | Preparación de muestras en laboratorio |

Para la constitución de muestras representativas, se proponen las siguientes recomendaciones<sup>1</sup> basadas en las directrices de la guía desarrollada en Francia para la aplicación de materiales alternativos en carreteras.

La estrategia de muestreo para un lote de escorias tratadas tendrá como objetivo constituir una muestra compuesta representativa (de masa M), basada en muestras elementales (de masa m) muestreadas estadísticamente.

La muestra compuesta global (de masa M), que según la norma UNE EN 932-1:1997 vendrá determinada por el tamaño de grano del material ensayado, estará formada (como mínimo) por al menos 24 muestras individuales (de masa m). Una vez obtenida la muestra compuesta de masa M, se llevará a cabo la reducción del tamaño de muestra para su envío a laboratorio, conforme a la norma UNE EN 932-2:1999.

<sup>1</sup> Estas recomendaciones se basan en las prescripciones proporcionadas por la guía sobre la caracterización ambiental de los depósitos de escoria (julio de 2009), las normas de muestreo de residuos NF EN 14899 (abril de 2006) y FD CEN/TR 15310 partes 1 a 5 (marzo de 2007), así como la norma relativa al muestreo de agregados NF EN 932-1 (diciembre de 1996). Estas recomendaciones, relativas al muestreo en flujo y en pila, utiliza también los resultados de los protocolos de muestreo de las cenizas de fondo de las instalaciones de incineración de residuos domésticos de incineración. .

La masa  $m$  de la muestra individual será la que resulta de dividir la masa  $M$  de la muestra compuesta entre el número de muestras individuales recogidas en total que deberá ser, como mínimo, de 24 muestras.

En función de las frecuencias de muestreo propuestas para el control ambiental: mensual o trimestral para el control mediante ensayo de volteo y anual para el control mediante ensayo de columna, se propone la siguiente frecuencia para la toma de muestras individuales.

- Control mensual: tomar al menos una **muestra incremental de masa  $m$  cada día** durante el periodo de fabricación;
- Control trimestral: tomar al menos **2 muestras incrementales de masa  $m$  cada semana** durante el periodo de fabricación;
- Control anual: tomar al menos **1 muestra incremental de masa  $m$  cada 15 días** durante el periodo de fabricación.

En el caso de instalaciones cuyo régimen de funcionamiento no sea continuo, las recomendaciones son las mismas. El muestreo se realizará sobre un lote de escoria tratada y almacenada en un montón representativo de un período definido (1 mes, 1 trimestre o 1 año). El objetivo es tener una muestra representativa de esta pila.



## **ANEXO II. PROPUESTA DE CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO DE LAS ESCORIAS DE SILICOMANGANESO**

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

## **Propuesta de criterios para el establecimiento del fin de condición de residuo de las escorias de silicomanganeso**

En base a toda la información recopilada y analizada en este estudio, se realiza la siguiente propuesta sobre el contenido mínimo que debería incluirse de cara a un posible establecimiento del FcR en nuestro país para las escorias de silicomanganeso de horno de arco eléctrico tras haber sido sometidas a un proceso de valorización para su uso como material de construcción en diversas aplicaciones, de manera que se garantice la protección del medio ambiente y la salud pública.

### **1. Residuos objeto de tratamiento de valorización**

Únicamente serán considerados como admisibles aquellos residuos generados durante el proceso de fabricación de aleaciones de silicomanganeso (ferroaleaciones) que se obtienen por reducción de los óxidos de manganeso y de silicio aportados por los diferentes minerales, en hornos eléctricos de arco-resistencia y a temperaturas elevadas.

El código LER asociado a este tipo de escorias es el *10 02 02* especificado a continuación:

*10. "Residuos de procesos térmicos".*

*10 02. " Residuos de la industria del hierro y del acero<sup>1</sup>".*

*10 02 02. "Escorias no tratadas".*

### **2. Tratamientos de las escorias de SiMn**

El proceso de valorización de las escorias de SiMn conlleva todas aquellas actuaciones necesarias para el uso final requerido, de manera que se asegure el cumplimiento de requisitos como el rendimiento mecánico, geotécnico y/o hidráulico necesario para cumplir las especificaciones técnicas del producto final.

El tratamiento requerido puede realizarse bien por el productor de las escorias o bien por un tercero, en los mismos centros de producción o en plantas externas, y deberán tener en cuenta las MTD de cara a la protección del medio ambiente.

- Almacenamiento y enfriamiento al aire libre

La escoria de silicomanganeso, una vez producida, deberá almacenarse a la espera de tratamiento en condiciones adecuadas de higiene y seguridad, en los términos de los artículos 27 y 28 de la *Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados*.

El enfriamiento de la escoria de SiMn podrá ser rápido, si se realiza con agua, o lento, si se deja secar al aire, en función de sus aplicaciones finales.

---

<sup>1</sup> Galicia y Cantabria las clasifican bajo este código, aunque no sean estrictamente del hierro y del acero.

Es recomendable que en esta etapa se evite la producción de lixiviados, priorizando el envejecimiento del material al aire. En cualquier caso, si el tratamiento implica la generación de lixiviados, los mismos deberán gestionarse o tratarse adecuadamente, evitando cualquier afección a los suelos y las aguas, superficiales o subterráneas.

- Recuperación del metal

La escoria de SiMn producida puede contener metal (alrededor del 5%) que es recuperado por diferencia de densidades.

- Machaqueo, trituración o molienda

La escoria de silicomanganeso se triturará utilizando la tecnología de machaqueo que garantice tamaños adecuados de acuerdo con los requerimientos técnicos de cada uso, así como la mayor optimización en la eliminación de elementos metálicos embebidos en la escoria.

Los estudios técnicos subrayan la necesidad de esta etapa previa para obtener una granulometría similar a la de un árido convencional. Con este tratamiento, se puede conseguir un material con un huso granulométrico determinado según la normativa de aplicación correspondiente, tanto en aplicaciones ligadas como no ligadas.

- Cribado y acopio

El material resultante se debe clasificar y acopiar atendiendo a fracciones granulométricas diferenciadas, en función del uso ulterior. Dichas fracciones granulométricas se acopiarán sobre superficie impermeable.

### **Requisitos de las instalaciones para el almacenamiento<sup>1</sup>**

Las instalaciones de valorización de escorias de silicomanganeso deberán disponer de una capa impermeable en aquellas zonas de almacenamiento de escorias sin tratar y en los acopios de escorias valorizadas, así como un adecuado pavimento y diseño de pendientes en las zonas de almacenaje y tratamiento para conducir las aguas pluviales que pudieran arrastrar lixiviados.

Las instalaciones deberán disponer de un sistema de recogida de lixiviados y aguas pluviales para su control y posterior tratamiento, antes de su vertido final, de manera que estas aguas no lleguen al suelo ni a las aguas subterráneas y superficiales.

---

<sup>1</sup> Nota técnica MITMA NT/2020: La recomendación de disponer de una superficie pavimentada y con pendientes adecuadas en la zona de acopios es válida para cualquier tipo de árido: natural o artificial, dada la gran ventaja que supone evitar el empleo de áridos contaminados o sucios.

Las instalaciones deberán disponer de un adecuado sistema de tratamiento de los lixiviados y aguas recogidas, especialmente en la etapa de envejecimiento con riego, que permita el cumplimiento de los valores límite de emisión establecidos en la correspondiente autorización de vertido.

En el caso de que se puedan generar materiales pulverulentos, deberá procederse a su almacenamiento en silos, en estructuras o en naves cerradas o bien se ha de localizar en una zona ubicada a sotavento y/o disponer de medidas antipolvo como mangas flexibles, preferentemente, o aspersores de agua.

Todo el entorno de la instalación deberá mantenerse adecuadamente de forma que la actividad de valorización no cause impactos adversos sobre el medio ambiente.

Los requisitos de la instalación, las operaciones básicas de la valorización de escorias y las medidas de control ambiental deberán ser acordes con lo establecido en el presente anexo, sin perjuicio del cumplimiento de todas las obligaciones establecidas en la normativa de residuos y suelos contaminados o, en su caso, de prevención y control integrados de la contaminación.

### 3. Requisitos técnicos de la escoria tratada

Para poder aplicar el FcR al material resultante producido (escoria tratada) deberá cumplir con:

- Los requisitos que se incluyen en las especificaciones y en normas técnicas que le sea de aplicación en función de su uso, de forma que pueda ser utilizado directamente para el fin atribuido.
- Las especificaciones adicionales que pudiera establecer el cliente en función de la aplicación final a la que vaya destinado.
- El potencial de lixiviación y el contenido total de determinadas sustancias en base a los requisitos que se establezcan como criterio FcR para garantizar la conformidad ambiental.

Para cualquiera de los posibles empleos contemplados en el PG-3 es preceptivo que la escoria tratada esté en posesión del marcado CE correspondiente. En la mayor parte de las aplicaciones reguladas en el PG-3, se exige que los áridos o materiales empleados **dispongan del marcado CE con un sistema de evaluación de la conformidad 2+**, para su incorporación en la correspondiente obra (artículo 5.b del Reglamento 305/2011, de 9 de marzo). De esta forma, se tendrá una garantía de que el material resultante del tratamiento cumple con las prescripciones técnicas necesarias para su uso como material de la construcción.

### 4. Usos permitidos de la escoria tratada

Los distintos usos en los que pueden emplearse las escorias de SiMn tratadas serían:

#### 1. Uso como árido

#### Escenarios de aplicación

- **Aplicaciones ligadas:** Uso de los materiales granulares mezclados con cualquier tipo de conglomerante que confiere cohesión al conjunto encapsulando los áridos dentro de una matriz

inorgánica, donde su exposición al medio y la liberación de componentes podrían considerarse nulas o despreciables.

- **Aplicaciones no ligadas:** Uso de materiales granulares compactados en capas para la ejecución de diversas unidades de obra civil, sin que se adicione conglomerante alguno, bajo coberturas de materiales impermeables.

Se propone establecer dos escenarios de aplicación no ligada, en función de si la cobertura bajo la que se aplique la escoria tratada es totalmente impermeable o no lo es.

No obstante, el empleo de escorias de acero tratadas como material alternativo en aplicaciones constructivas no ligadas, puede representar una potencial afección al medio ambiente debido a la liberación de sus componentes al medio. Por ello, es necesario establecer una serie de criterios y limitaciones de uso, de manera que únicamente se consideren admisibles aquellos usos que garanticen tanto la calidad técnica como producto para una determinada aplicación, como la no generación de impactos adversos al medio ambiente y a la salud humana.

### Usos permitidos

De todos los posibles usos técnicamente viables de la escoria de SiMn, aquellos que por el tipo y condiciones de aplicación presentan un menor riesgo potencial de generar una afección al medio y que, por tanto, se permiten con carácter general desde el punto de vista ambiental, y siempre y cuando se garantice el cumplimiento de los requisitos y condiciones de uso establecidas en la norma FcR, son los siguientes:

- Aplicaciones ligadas
- Aplicaciones no ligadas bajo cobertura totalmente impermeable

El uso de las escorias tratadas para las aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable o aplicaciones no ligadas que impliquen contacto directo con suelo estará **condicionado al cumplimiento de las siguientes condiciones para garantizar la no generación de dichos impactos:**

- Limitaciones de espesor

Se propone limitar el uso de estas escorias en aplicaciones no ligadas con cobertura no totalmente impermeable a aquellas **cuya norma de uso** establezca **espesores limitados** como es el caso de las capas de subbalasto. Los grandes espesores de escoria aumentan la cantidad de lixiviado que se genera y no se puede establecer su no afección al medioambiente.

- Valores límite de contenido en el lixiviado

Para poder garantizar que durante el empleo de escorias tratadas en **aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable sin restricción de espesor** no se van a generar impactos adversos a la salud humana y al medioambiente y, por tanto, se pueda permitir su uso, **el contenido máximo en el lixiviado deberá ser inferior a unos valores límite de lixiviación establecidos en base a un análisis cuantitativo de**

**riesgos que, en ningún caso, podrán ser superiores a los valores límite de lixiviación establecidos para vertederos inertes.**

Dicho análisis de riesgos deberá contemplar un escenario que pueda considerarse representativo del empleo de la escoria tratada en este tipo de aplicaciones, que incluya al menos, la altura de aplicación, la capacidad de impermeabilización de la cobertura bajo la cual se va a aplicar la escoria, todas las vías de exposición, así como los potenciales receptores.

Hasta que se haya establecido una **metodología común** para llevar a cabo dicho análisis de riesgos, un procedimiento para la definición de los escenarios de aplicación de las escorias como material de la construcción bajo cobertura no totalmente impermeable, y un procedimiento para la validación de los análisis de riesgos realizados en base a dicha metodología por un órgano con capacidad suficiente, este tipo de aplicaciones estarán limitadas.

Los valores límite de lixiviación establecidos en las normas de valorización de las tres CCAA que han regulado el uso de las escorias tratadas, se corresponden con los fijados en la Decisión del Consejo de 19 de diciembre de 2002 para admisión de residuos inertes en vertederos. Sin embargo, estos valores no pueden considerarse representativos de un escenario de aplicación de las escorias como árido bajo cobertura no totalmente impermeable y sin restricción de espesor, al haber sido establecidos para un escenario diferente.

En concreto, estos valores límite han sido definidos para un escenario que, según la normativa de aplicación<sup>1</sup>, deberá estar diseñado para garantizar una estanqueidad y recogida eficaz de los lixiviados mediante la combinación de una barrera geológica y de un revestimiento artificial estanco bajo la masa de residuos, además de contar con medidas de control de contaminación tanto al suelo como a las aguas subterráneas y superficiales. Estas condiciones no se dan en ninguno de los usos propuestos para el uso de estas escorias tratadas.

Únicamente para aquellos usos que, por sus condiciones de aplicación, presentan un menor riesgo potencial de generar una afección al medio, como son las aplicaciones no ligadas bajo cobertura totalmente impermeable o aquellas bajo cobertura no totalmente impermeable con restricción de espesor (como en capas de subbalasto), se propone contemplar estos valores límite de lixiviación. **Estos usos se se referenciarán como “usos permitidos con menor riesgo ambiental”.**

No se considera necesario el establecimiento de valores límite para las escorias de SiMn cuando son empleadas en aplicaciones ligadas o se encuentren formando parte de una matriz como materia prima

En el caso de las **aplicaciones no ligadas**, para cada uno de los tipos de usos permitidos, es decir, aquellos cuyo uso se permite por presentar un menor riesgo de generar una afección al medio y aquellos para los que

---

<sup>1</sup> Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

se requieren una serie de condicionantes adicionales, por presentar mayor riesgo ambiental, se han establecido los siguientes valores límite:

**Anexo I. Tabla I. Valores límite de lixiviación para aplicaciones no ligadas (mg/kg).**

| Parámetro*              | Usos permitidos con menor riesgo ambiental | Usos permitidos con mayor riesgo ambiental                                  |
|-------------------------|--|---|
| Arsénico (As)           | 0,5  |   |
| <b>Bario (Ba)</b>       | 20   |   |
| Cadmio (Cd)             | 0,04                                       |   |
| <b>Cromo total (Cr)</b> | 0,5  |   |
| Cromo (VI)              | 0,1  |   |
| Cobre (Cu)              | 2  |   |
| <b>Mercurio (Hg)</b>    | 0,01                                       |   |
| <b>Molibdeno (Mo)</b>   | 0,5  | Valores limite establecidos a partir de un análisis de riesgos cuantitativo |
| <b>Níquel (Ni)</b>      | 0,4  |   |
| Plomo (Pb)              | 0,5  |   |
| <b>Antimonio (Sb)</b>   | 0,06                                       |   |
| <b>Selenio (Se)</b>     | 0,1  |   |
| <b>Zinc (Zn)</b>        | 4  |   |
| <b>Cloruros</b>         | 800  |   |
| <b>Fluoruros</b>        | 18   |   |
| <b>Sulfatos</b>         | 1.000                                      |   |

\* En *negrita aquellos elementos citados en los distintos estudios sobre comportamiento ambiental que son importantes controlar en la escoria de SiMn*

En ambos casos, el control de la lixiviación de las escorias tratadas se llevará a cabo mediante un ensayo de volteo según la norma UNE-EN-12457-4, que deberá ser realizado por laboratorio acreditado en todos los parámetros, comprobándose la no superación de los valores límite establecidos en la tabla anterior, no pudiéndose ajustar estos valores mediante adición o mezcla con otros materiales.

En el Anexo V se realiza una propuesta sobre los métodos de ensayo normalizados para la determinación de cada uno de los parámetros a controlar expuestos en las tablas anteriores.

El seguimiento del cumplimiento de estos parámetros se realizará a través de análisis periódicos cuya frecuencia se muestra a continuación:

**Anexo I. Tabla II. Frecuencia de muestreo y control de la producción.**

| Producción anual | N.º muestras | Frecuencia |
|------------------|--------------|------------|
| <30.000 t/año    | 1            | 3 meses *  |
| >30.000 t/año    | 1            | 1 mes **   |



| Producción anual | N.º muestras | Frecuencia |
|------------------|--------------|------------|
|------------------|--------------|------------|

*\* Si se obtienen resultados conformes a lo dispuesto durante doce muestras consecutivas, la frecuencia de muestreo se reducirá a una muestra al semestre siempre y cuando se mantengan dichos resultados positivos. En caso contrario, se retornará a la frecuencia original.*

*\*\* Si se obtienen resultados conformes a lo dispuesto durante doce muestras consecutivas, la frecuencia de muestro se reducirá a una muestra al trimestre siempre y cuando se mantengan dichos resultados en positivo. En caso contrario, se retornará a la frecuencia original.*

Por otra parte, al menos una vez al año, se deberá llevar a cabo un ensayo de lixiviación en columna de flujo ascendente, de acuerdo con la especificación técnica PNE-prEN 16637-3<sup>1</sup> Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Part 3: Horizontal up-flow percolation test, comprobándose la no superación de los valores límite establecidos en la siguiente tabla:

**Anexo I. Tabla III. Valores límite de lixiviación del material resultante para aplicaciones no ligadas conforme a la norma PNE-prEN 16637-3 (mg/kg).**

| Parámetro               | Valores límite |
|-------------------------|----------------|
| Arsénico (As)           | 0,8            |
| <b>Bario (Ba)</b>       | 22             |
| Cadmio (Cd)             | 0,03           |
| <b>Cromo total (Cr)</b> | 0,5            |
| Cromo (VI)              | 0,1            |
| Cobre (Cu)              | 0,5            |
| <b>Mercurio (Hg)</b>    | 0,02           |
| <b>Molibdeno (Mo)</b>   | 1              |
| Níquel (Ni)             | 0,44           |
| Plomo (Pb)              | 1,3            |
| Antimonio (Sb)          | 0,32           |
| <b>Selenio (Se)</b>     | 0,15           |
| Zinc (Zn)               | 2,8            |
| <b>Vanadio (V)</b>      | 1,8            |
| Cloruros                | 616            |
| <b>Fluoruros</b>        | 55             |
| Sulfatos                | 2.430          |

<sup>1</sup> En la actualidad esta norma se encuentra en tramitación. Una vez que se publique la norma definitiva y haya constancia de la existencia de laboratorios acreditados en dicha norma, será obligatorio que este ensayo se realice por laboratorio acreditado en todos los parámetros.

El objetivo es poder efectuar una **comparación entre los resultados** obtenidos por el ensayo de columna para la relación líquido sólido de 10 L/kg con los que se obtendrían del ensayo más habitual (UNE-EN 12457-4), lo que permitiría **definir de forma más precisa las especificaciones y frecuencias de ensayo** que se habrían de exigir según los distintos niveles de caracterización.

- Valores límite de contenido total

Para **aquellas aplicaciones no ligadas que impliquen contacto directo con suelo**, únicamente se podrá garantizar la no generación de impactos adversos a la salud humana y al medio ambiente mediante el cumplimiento de valores límite de contenido total, que estén basados en criterios de protección del suelo.

Como valores límite de contenido total se considera adecuado contemplar los niveles genéricos de referencia (NGR)<sup>1</sup> establecidos en suelos, dado que, en ningún caso, se debería admitir aplicar un material al suelo con unas concentraciones totales de contaminantes superiores a las que podrían representar un riesgo para la salud humana o el medio ambiente en términos de contaminación del suelo.

Aplicando el principio de precaución y teniendo en cuenta el criterio contemplado en la norma de valorización de escorias de acería del País Vasco, se propone considerar los valores de referencia establecidos para la categoría “otros usos”, que es la más restrictiva de todas las categorías de suelo establecidas en la normativa de protección de suelos tanto a nivel nacional como autonómico: uso industrial, uso urbano y otros usos.

No obstante, cabe señalar que, así como a nivel nacional se han determinado los NGR para compuestos orgánicos, los de los metales pesados se han establecido a nivel individual por las CCAA, teniendo en cuenta los valores de fondo específicos de cada CA, así como los usos del suelo y la ordenación del territorio en cada comunidad. Es por ello que no es factible poder establecer un **marco común a nivel nacional** relativo al establecimiento de valores límite de contenido total en las escorias tratadas, que garantizaría la no generación de impactos adversos a la salud humana y al medio ambiente para las aplicaciones que implican un contacto directo con el suelo.

Debido a la imposibilidad de poder establecer un marco común **a nivel nacional** para el establecimiento de valores límite de contenido total, el uso de la escoria tratada en aquellas aplicaciones no ligadas que impliquen contacto directo con suelo (tanto bajo cobertura totalmente impermeable como no totalmente impermeable) únicamente será posible **en aquellas CCAA en las que se hayan definido niveles genéricos de referencia para la categoría de suelo “otros usos”**, y siempre que las concentraciones de contenido total presente en las escorias tratadas no sean superiores a dichos NGR.

---

<sup>1</sup> **Nivel genérico de referencia (NGR):** Concentración de una sustancia contaminante en el suelo que no conlleva un riesgo superior al máximo aceptable para la salud humana o los ecosistemas, calculada de acuerdo con los criterios recogidos en el anexo VII del Real Decreto 9/2005, 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.

En caso de que las CCAA, decidan establecer valores límite de contenido total distintos a los NGR para la categoría “otros” usos para uno o varios parámetros, deberán justificar el motivo de su modificación, garantizando, en todo caso, una adecuada protección del suelo.

## **2. Otros usos: como materia prima en la fabricación de productos de construcción**

### **Usos permitidos**

Las escorias de SiMn se consideran adecuadas con carácter general para su empleo como:

- materia prima en la fabricación de clínker
- como adición activa en la fabricación de cemento

En ambos casos no se considera necesario el establecimiento de condicionantes de carácter técnico ni ambiental.

En la tabla adjunta al final del anexo, se resumen los distintos escenarios de aplicación considerados y los posibles destinos de la escoria tratada contemplados en cada uno, para los dos tipos de usos permitidos: aquellos cuyo uso se permite con carácter general por presentar un menor riesgo de generar una afección al medio y aquellos para los que se requieren una serie de condicionantes adicionales, por presentar mayor riesgo ambiental.

## **5. Condiciones y restricciones de uso**

### **Condiciones de carácter técnico**

Para los distintos destinos de la escoria tratada en función del escenario de aplicación contemplado, se proponen una serie de condiciones de carácter técnico (en función de las limitaciones a su viabilidad técnica) y condiciones de uso (basadas en las propuestas recogidas en la *Guía de Aplicación del Decreto de Actividades de Valorización de Escorias Negras de Fabricación de Acero en Hornos de Arco Eléctrico y su Utilización como Árido Siderúrgico*<sup>1</sup> que se pueden consultar en la tabla final del anexo.

### **Condiciones de carácter ambiental**

Para cada uno de los escenarios de aplicación contemplados, se propone el cumplimiento de una serie de requisitos de carácter ambiental (véase tabla al final del anexo).

Como condicionante ambiental no se contempla establecer un espesor máximo de aplicación de la escoria tratada, ya que éste vendrá limitado por las especificaciones técnicas para cada aplicación específica.

---

<sup>1</sup> *Guía de Aplicación del Decreto de Actividades de Valorización de Escorias Negras de Fabricación de Acero en Hornos de Arco Eléctrico y su Utilización como Árido Siderúrgico. 2019*

Por otra parte, se propone establecer las siguientes restricciones de uso relativas a la protección de aguas subterráneas y/oo superficiales:

- No se utilizarán en espacios que presenten alguna figura de protección especial contemplada en la normativa sobre la conservación de la naturaleza.
- No se utilizarán en aquellos usos en los que se encuentren en contacto con el agua (como aplicaciones drenantes), así como en zonas inundables o en aquellas zonas comprendidas dentro de los perímetros de protección de acuíferos.
- No se utilizarán en usos en los que se emplacen sin cobertura alguna, tales como pistas forestales, caminos rurales no asfaltados ni hormigonados o balastos ferroviarios.

Anexo II. Tabla IV. Usos permitidos, condiciones técnicas, condiciones de uso y condiciones ambientales de la escoria de SiMn

| ESCORIAS DE SILICO-MANGANESO |  |   |  |  |  |
|------------------------------|--|---|--|--|--|
| Usos permitidos              | Escenario de aplicación  | Destinos  | Condiciones técnicas <sup>1</sup>  | Condiciones de uso   | Condiciones de carácter ambiental  |
| Con menor riesgo ambiental   | Como materia prima en la fabricación de productos de la construcción | Fabricación de clínker en cementera   | -  | Dosificación máxima en el cemento del 3%.<br><br>Contenido máximo en las escorias del 8% en MnO y del 5% en humedad.   | No se requieren  |
|                              |  | Adición activa en la fabricación de cemento como material puzolánico <sup>2</sup> | -  | Como material puzolánico en la fabricación de cementos comerciales tipo II hasta una mezcla del 30 %, aunque se recomienda adicionar en un máximo de un 5% mientras no se homologue su uso en normativa. | No se requieren  |
|                              | Como árido en aplicaciones ligadas                                   | Fabricación de hormigón   | Granulometría: Puede ser necesario adicionar finos. Quedan excluidas las aplicaciones en | Finura aceptable (6.600 de finura Blane) con molienda mínima de 1 h o superior. Deberían tener al menos un diámetro medio de 10 micras.  | Como material granular con el 100% de árido (fino y grueso) de escoria de SiMn |

<sup>1</sup> Todas las condiciones establecidas deben entenderse sin perjuicio de lo que establezca la normativa específica vigente en cada caso concreto, y sin perjuicio de lo que establezca el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del Proyecto que corresponda.

<sup>2</sup> Aplicación no incluida específicamente en el Decreto 100/2018, de de 20 de diciembre, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria, que únicamente incluye el uso de la escoria de SiMn para la fabricación de Clinker.

| ESCORIAS DE SILICO-MANGANESO |   |  |  |   |   |
|------------------------------|---|--|--|---|---|
| Usos permitidos              | Escenario de aplicación   | Destinos   | Condiciones técnicas <sup>1</sup>  | Condiciones de uso  | Condiciones de carácter ambiental   |
| Con menor riesgo ambiental   |   |  | hormigones de resistencia superior a 60 N/mm <sup>2</sup> y hormigones pretensados.  |   |   |
|                              | Como árido en aplicaciones no ligadas bajo cobertura totalmente impermeable | Zahorra para construcción de firmes de carreteras: <ul style="list-style-type: none"> <li>En construcción de firmes (base, subbase, explanada mejorada)</li> <li>Como material granular para base/subbase de vías peatonales, ciclistas y pistas deportivas</li> <li>Como material para explanada mejorada.</li> </ul> | Aplicable a la categoría de tráfico T3, T4, estipuladas en el PG-3, y en ningún caso para tráfico elevados, siendo requisito imprescindible su mezcla con otro tipo de materiales, en al menos un 25%, o un adecuado proceso de machaqueo para cumplir con las especificaciones relativas al contenido de azufre (<1%) y el huso granulométrico (ZAD20). | No se emplearán en zonas confinadas, como bases o subbases limitadas por bordillos. Las capas en las que se utilicen se deben drenar adecuadamente, evitando el estancamiento de agua. Irán localizadas en la capa estructural del firme de carreteras (capa base y/o subbase) sobre la explanada y bajo el pavimento que garantizará una cobertura de alta impermeabilización. | <ul style="list-style-type: none"> <li>Valores límite de lixiviación de admisión de residuos inertes en vertederos (salvo fluoruros)</li> <li>Aplicación de la escoria tratada bajo una capa impermeable, garantizando al menos una tasa de infiltración de agua inferior a 6 mm/año.</li> <li>En caso de que se localicen sobre terreno natural deberán cumplir los valores límite de contenido total establecidos (NGR</li> </ul> |
|                              |   | Rellenos localizados bajo cobertura totalmente impermeable   | -  | Los rellenos se localizarán bajo aceras, soleras, firmes de carretera u otros tipos de coberturas que aseguren una alta impermeabilización.   |   |
|                              |   | Zahorra para terraplenes. Únicamente podrán emplearse en núcleo y coronación   | -  | Irán situados bajo la capa de explanada o de firme. Podrán utilizarse en las zonas de coronación y núcleo por estar bajo  |   |

| ESCORIAS DE SILICO-MANGANESO |   |  |   |  |   |
|------------------------------|---|--|---|--|---|
| Usos permitidos              | Escenario de aplicación   | Destinos                                 | Condiciones técnicas <sup>1</sup>                   | Condiciones de uso   | Condiciones de carácter ambiental   |
|                              |   |  |   | coberturas de alta impermeabilización. No podrán utilizarse en zonas expuestas de talud (espaldones) incluso cuando tengan coberturas de tierra natural, ni tampoco en la cimentación. | categoría otros usos de cada CCAA)  |
|                              | Como árido en aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable, en el que, por condicionantes de carácter constructivo, se garantiza una limitación máxima de espesor | Sub-balasto de vías férreas <sup>1</sup> | Granulometría: Puede ser necesario adicionar finos. | Se dispondrá entre la capa de forma de la vía férrea y la capa de balasto que corona la vía.   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Valores límite de lixiviación de admisión de residuos inertes en vertederos (salvo fluoruros)</li> <li>Se podrán emplear cuando se asegure cierta limitación de infiltración, bien por el propio tipo de material, bien mediante la adopción de medidas complementarias</li> </ul> |

<sup>1</sup> Aplicación no incluida específicamente en el Decreto 100/2018, de de 20 de diciembre, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria, siempre que se garantice el cumplimiento de los requisitos de la normativa de aplicación para este uso y se garantice cierta limitación de infiltración de agua.

| ESCORIAS DE SILICO-MANGANESO      |  |  |                                   |  |  |
|-----------------------------------|--|--|-----------------------------------|--|--|
| Usos permitidos                   | Escenario de aplicación  | Destinos   | Condiciones técnicas <sup>1</sup> | Condiciones de uso   | Condiciones de carácter ambiental  |
|                                   | Como árido en vertederos   | Capa para el sellado de vertederos y pistas provisionales en su interior durante la explotación de este, y, en general, en cualquier aplicación siempre que se realice dentro de la zona de impermeabilización del vaso de vertido.  | -                                 | Los rellenos podrán ir situados en la capa de regularización, directamente sobre el vertido de residuos y bajo las diferentes capas que garantizan la impermeabilización parcial o total del vertedero.<br>Como material constructivo se usará siempre que se trate dentro de la zona de impermeabilización del vaso de vertido. | Valores límite de lixiviación de admisión para el tipo de vertedero en cuestión.   |
| <b>Con mayor riesgo ambiental</b> | Como árido en aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable sin restricción de espesor y sin contacto directo con suelo | <ul style="list-style-type: none"> <li>Zonas expuestas de talud (espaldones) y cimentación en terraplenes</li> <li>Rellenos localizados o asimilables a terraplén (relleno en trasdós de obra de fábrica y en trasdós de muro de contención, nivelación de terrenos).</li> </ul> | -                                 | Zonas expuestas de talud: Se asegurará una cierta limitación de infiltración, bien por el propio tipo de material, bien mediante la adopción de medidas complementarias. En el caso de terrenos de nivelación, se adoptarán las mismas consideraciones.  | Valores límite de lixiviación establecidos en base a un análisis cuantitativo de riesgos.  |
|                                   | Como árido en aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable sin restricción de espesor y con                            |  | -                                 | Rellenos localizados: carecerán de cualquier tipo de misión drenante. Se interpondrá una capa de material granular compactado sobre el relleno de escoria tratada a modo de "semi" barrera para limitar la infiltración.   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Valores límite de lixiviación establecidos en base a un análisis cuantitativo de riesgos.</li> <li>En caso de contacto directo con el suelo.</li> </ul> |



| ESCORIAS DE SILICO-MANGANESO |                            |          |                                   |                    |  |
|------------------------------|----------------------------|----------|-----------------------------------|--------------------|--|
| Usos permitidos              | Escenario de aplicación    | Destinos | Condiciones técnicas <sup>1</sup> | Condiciones de uso | Condiciones de carácter ambiental  |
|                              | contacto directo con suelo |          |                                   |                    | Valores límite de contenido total (NGR categoría otros usos de cada CCAA). |

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

## 6. Plan de muestreo y toma de muestras

La caracterización de la escoria tratada, tanto en lo relativo a las propiedades técnicas que habrá de cumplir en función de la aplicación final a la que vaya destinado (control de la calidad), como en lo relativo a la protección ambiental, deberá llevarse a cabo conforme a un plan de muestreo que permita obtener una muestra representativa del lote muestreado.

En el caso de que se fabriquen diferentes materiales alternativos (gama completa de cortes de áridos: arena, grava, etc.) a partir de un mismo lote (mensual, trimestral o semestral) de escoria bruta, el Fabricante realizará el control de conformidad sobre el corte cuya granulometría corresponda a la fracción más fina comercializada.

Este plan de muestreo podrá ser diseñado de acuerdo con lo dispuesto en las siguientes normas.

**Anexo II. Tabla VII. Normas o estándares recomendados para la toma de muestras**

| Producción anual  | Objeto                                 |
|---|--|
| UNE-EN 932-1:1997. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo.                                 | Toma de muestras                       |
| UNE-EN 932-2:1999. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio. | Preparación de muestras en laboratorio |

Para la constitución de muestras representativas, se proponen las siguientes recomendaciones<sup>1</sup> basadas en las directrices de la guía desarrollada en Francia para la aplicación de materiales alternativos en carreteras.

La estrategia de muestreo para un lote de escorias tratadas tendrá como objetivo constituir una muestra compuesta representativa (de masa M), basada en muestras elementales (de masa m) muestreadas estadísticamente.

La muestra compuesta global (de masa M), que según la norma UNE EN 932-1:1997 viene determinada por el tamaño de grano del material ensayado, estará formada (como mínimo) por al menos 24 muestras individuales (de masa m). Una vez obtenida la muestra compuesta de masa M, se llevará a cabo la reducción del tamaño de muestra para su envío a laboratorio, conforme a la norma UNE EN 932-2:1999.

<sup>1</sup> Estas recomendaciones se basan en las prescripciones proporcionadas por la guía sobre la caracterización ambiental de los depósitos de escoria (julio de 2009), las normas de muestreo de residuos NF EN 14899 (abril de 2006) y FD CEN/TR 15310 partes 1 a 5 (marzo de 2007), así como la norma relativa al muestreo de agregados NF EN 932-1 (diciembre de 1996). Estas recomendaciones, relativas al muestreo en flujo y en pila, utiliza también los resultados de los protocolos de muestreo de las cenizas de fondo de las instalaciones de incineración de residuos domésticos de incineración. .

La masa  $m$  de la muestra individual será la que resulta de dividir la masa  $M$  de la muestra compuesta entre el número de muestras recogidas en total que deberá ser, como mínimo, de 24 muestras.

En función de las frecuencias de muestreo propuestas para el control ambiental, mensual o trimestral para el control mediante ensayo de volteo y anual para el control mediante ensayo de columna, se propone la siguiente frecuencia para la toma de muestras individuales.

- Control mensual: tomar al menos una **muestra incremental de masa  $m$  cada día** durante el periodo de fabricación;
- Control trimestral: tomar al menos **2 muestras incrementales de masa  $m$  cada semana** durante el periodo de fabricación;
- Control anual: tomar al menos **1 muestra incremental de masa  $m$  cada 15 días** durante el periodo de fabricación.

En el caso de instalaciones cuyo régimen de funcionamiento no sea continuo, las recomendaciones son las mismas. El muestreo se realizará sobre un lote de escoria tratada y almacenada en un montón representativo de un período definido (1 mes, 1 trimestre o 1 año). El objetivo es tener una muestra representativa de esta pila.

## **ANEXO III. PROPUESTA DE CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO DE LAS ESCORIAS DE COBRE**

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

## **Propuesta de criterios para el establecimiento del fin de condición de residuo de las escorias de cobre**

En base a toda la información recopilada y analizada en este estudio a continuación se realiza la siguiente propuesta sobre el contenido mínimo que debería incluirse de cara a un posible establecimiento del FcR en nuestro país de las escorias de cobre de horno de arco eléctrico, tras haber sido sometidas a un proceso de valorización para su uso como material de construcción en diversas aplicaciones de manera que se garantice la protección del medio ambiente y la salud pública.

### **1. Residuos objeto de tratamiento de valorización**

Solo serán considerados como admisibles aquellos residuos generados durante la fusión de concentrados de cobre en el proceso pirometalúrgico que comprende los procesos de fundición y refinación de cobre, denominados generalmente como escoria de cobre o silicato de hierro.

El código LER asociado a este tipo de escorias es el *10 06 01* especificado a continuación:

*10. "Residuos inorgánicos de procesos térmicos"*

*10 06. " Residuos de la termometalurgia del cobre"*

*10 06 01. "Escorias (primera y segunda fusión)"*

### **2. Tratamientos de las escorias de cobre**

El proceso de valorización de las escorias de cobre consta de ciertas etapas para garantizar calidades y tamaños óptimos del material granular resultante, con objeto de comercializarse para sus diferentes aplicaciones finales.

En función de la información disponible, la escoria de cobre no necesita ser tratada con objeto de alterar su composición química o las propiedades intrínsecas de la misma, por lo que no requiere etapas de maduración o envejecimiento, careciendo de fenómenos de expansividad. Tampoco se ha constatado la realización de una etapa de desmetalización, habitual en otro tipo de escorias.

#### **o Almacenamiento y enfriamiento**

Las escorias, una vez producidas, deberán almacenarse a la espera de tratamiento en condiciones adecuadas de higiene y seguridad, en los términos de los artículos 27 y 28 de la *Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados*.

El enfriamiento de la escoria de cobre podrá ser rápido, si se realiza con agua, o lento, si se deja secar al aire, en función de sus aplicaciones finales.

Es recomendable que en esta etapa se evite la producción de lixiviados, priorizando el envejecimiento del material al aire. En cualquier caso, si el tratamiento implica la generación de lixiviados, los mismos deberán gestionarse o tratarse adecuadamente, evitando cualquier afección a los suelos y las aguas, superficiales o subterráneas.

- Machaqueo, trituración o molienda

La escoria de cobre se triturará, en caso de ser necesario, utilizando la tecnología que garantice tamaños adecuados de acuerdo a los requerimientos técnicos de cada uso.

- Cribado y acopio

El material resultante se debe clasificar y acopiar atendiendo a fracciones granulométricas diferenciadas, en función del uso ulterior. Dichas fracciones granulométrica se acopiarán sobre superficie impermeable.

### **Requisitos de las instalaciones para el almacenamiento**

Las instalaciones de valorización de escorias de cobre deberán disponer de una capa impermeable en aquellas zonas de almacenamiento de escorias sin tratar y en los acopios de escorias tratadas, así como un adecuado pavimento y diseño de pendientes en las zonas de almacenaje y tratamiento para conducir las aguas pluviales que pudieran arrastrar lixiviados.

Las instalaciones deberán disponer de un sistema de recogida de lixiviados y aguas pluviales para su control y posterior tratamiento, antes de su vertido final, de manera que estas aguas no lleguen al suelo ni a las aguas subterráneas y superficiales.

Las instalaciones deberán disponer de un adecuado sistema de tratamiento de los lixiviados y aguas recogidas, especialmente en la etapa de envejecimiento con riego, que permita el cumplimiento de los valores límite de emisión establecidos en la correspondiente autorización de vertido.

En el caso de que se puedan generar materiales pulverulentos, deberá procederse a su almacenamiento en silos, en estructuras o en naves cerradas o bien se ha de localizar en una zona ubicada a sotavento y/o disponer de medidas antipolvo como aspersores de agua o mangas flexibles.

Todo el entorno de la instalación deberá mantenerse adecuadamente de forma que la actividad de valorización no cause impactos adversos sobre el medio ambiente.

Los requisitos de la instalación, las operaciones básicas de la valorización de escorias y las medidas de control ambiental deberán ser acordes con lo establecido en el presente anexo, sin perjuicio del cumplimiento de todas las obligaciones establecidas en la normativa de residuos y suelos contaminados o, en su caso, de prevención y control integrados de la contaminación.

### **3. Requisitos técnicos de la escoria tratada**

Para poder aplicar el FcR al material resultante producido (escoria tratada) deberá cumplir con:

- Los requisitos que se incluyen en las especificaciones y en normas técnicas que le sea de aplicación en función de su uso, de forma que pueda ser utilizado directamente para el fin atribuido.
- Las especificaciones adicionales que pudiera establecer el cliente en función de la aplicación final a la que vaya destinado.



#### 4. Usos permitidos de la escoria tratada

Los distintos usos en los que pueden emplearse las escorias de cobre tratadas serían:

**Anexo III. Tabla I. Usos permitidos para la escoria de cobre**

| Usos permitidos        | Destinos   |
|------------------------|--|
| Material abrasivo      | Para la preparación de superficies metálicas mediante la técnica de chorreado. |
| Fabricación de clínker | Como corrector de hierro en la fabricación de clínker de cemento Portland      |

#### 5. Condiciones y restricciones de uso

Para los dos usos permitidos de la escoria de cobre, se proponen las siguientes condiciones de carácter técnico (en función de las limitaciones a su viabilidad técnica) y ambiental:

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

**Anexo III. Tabla II. Condiciones de carácter técnico y ambiental**

| ESCORIAS DE COBRE          |  |  |  |   |
|----------------------------|--|--|--|---|
| Usos permitidos            | Escenarios de aplicación   | Destinos   | Condiciones técnicas   | Condiciones de carácter ambiental   |
| Con menor riesgo ambiental | Material abrasivo  | Para la preparación de superficies metálicas mediante la técnica de chorreado. | Se debe tener en cuenta el tamaño granulométrico para obtener el tamaño óptimo de uso fijado por el cliente (habitualmente comprende un intervalo de 0,4 a 2,8 mm).  | <p>La instalación deberá disponer de un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo que garantice el cumplimiento de las obligaciones sobre seguridad y salud respecto a las actividades de abrasión con escoria de cobre.</p> <p>Tras su empleo, un gestor de residuos autorizado deberá encargarse de la gestión del material resultante.</p> |
|                            | Como materia prima en la fabricación de productos de la construcción | Fabricación de clínker en cementera (cemento Portland)                         | <p>La adición de componentes correctores (en este caso, de hierro) solo es posible en una escala limitada que oscila entre el 1 y el 2%, pudiendo llegar al 5% (conforme a la norma UNE-EN 197-1).</p> <p>Contenido mínimo de hierro en torno al 40%, 50% o 55% expresado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.</p> <p>Contenido máximo de azufre de 4% de SO<sub>3</sub>.</p> <p>Contenido máximo de humedad del 2%, 5% o 14% expresado como H<sub>2</sub>O en función del tipo de cemento.</p> | No se requieren   |

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

## **ANEXO IV. ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN**



## 1. INTRODUCCIÓN

Los materiales de construcción pueden contener componentes peligrosos solubles que, al ser aplicados en el exterior, el agua de lluvia, el agua superficial o las aguas subterráneas pueden provocar lixiviados con concentraciones de componentes elevados que podrían suponer una potencial amenaza al medio ambiente. Por ello, los ensayos de lixiviación han demostrado ser una herramienta de caracterización indispensable.

Para poder tomar decisiones respecto al uso, tratamiento y/o vertido, tanto de residuos como de residuos de producción industriales, de la construcción y de materiales secundarios, se necesitan referencias objetivas, y a ser posible numéricas de los impactos ambientales que las distintas alternativas pueden generar. Los ensayos de lixiviación pueden contribuir decisivamente en este aspecto. En general, el contenido total de un contaminante no es un factor decisivo sino su capacidad de ser incorporado a las aguas, superficiales o subterráneas, es decir su capacidad de lixiviación. Cuando el residuo sólido considerado entra en contacto con el agua, algunos de sus constituyentes se disolverán parcial o totalmente en ella creándose un extracto o lixiviado.

Por este motivo, muchos países han desarrollado ensayos de lixiviación; hasta el punto de que, en algunos casos, el nivel de desarrollo de dichos ensayos es tan elevado que la propia legislación está basada en ellos. Debido a la importancia de la lixiviación en los materiales de la construcción y su posible impacto medioambiental, en Europa se han creado más de 40 comités técnicos que han desarrollado individualmente su propio ensayo de lixiviación.

Para el desarrollo de este anexo se han empleado como principal referencia los siguientes estudios:

- *A. Hidalgo y C. Alonso. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento. 2005.*
- *H.A. van der Sloot and J.J. Dijkstra. Development of horizontally Standardized leaching tests for construction materials: A material based or release based approach? Identical leaching mechanisms for different materials. ECN-C--04-060, ECN 2004*
- *Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis de Máster. Estudio del impacto ambiental por lixiviación de la escoria de acería en capas granulares no ligadas 706-TFM-314 Autor Karmele Otegi Aldai. 2012.*

## 2. LIXIVIACIÓN

La lixiviación es el proceso por el cual determinados contaminantes orgánicos o inorgánicos son liberados de una fase sólida a una fase acuosa debido a diferentes procesos como la disolución del mineral, la adsorción/desorción o procesos complejos afectados por el pH, el potencial redox, la materia orgánica disuelta o la actividad biológica (micro).

La cantidad disponible de un elemento para ser lixiviado, bajo condiciones extremas, es una información necesaria para poder predecir las cantidades máximas que se pueden lixiviar a largo plazo. Se habla en este caso del término “**disponibilidad**”, para indicar la **concentración máxima lixiviable de un elemento**. Para

utilizar este parámetro de una manera correcta, es importante que las condiciones durante una prueba de disponibilidad sean acordes con la situación real.

La concentración total de un componente no tiene una relación directa con el impacto medioambiental. La **concentración potencialmente lixiviable** de un componente, es lo que lixiviaría en el peor de los casos, es decir en un caso extremo.

Dependiendo de determinados parámetros relevantes de un escenario de aplicación, como por ejemplo el pH, la cantidad lixiviada puede estar en órdenes de magnitud por debajo de la fracción potencialmente lixiviable; particularmente en los casos en los que se ha realizado un tratamiento para reducir el impacto medioambiental (vitrificación, solidificación / estabilización, etc.).

Por tanto, **la concentración total, y, en menor extensión, la concentración potencialmente lixiviable, no son limitantes necesariamente**. Se puede decir que el comportamiento frente a la lixiviación de todos los tipos de materiales está relacionado con factores críticos, como la **solubilidad** de cada elemento.

## 2.1 TIPO DE MATERIAL

En términos de comportamiento frente a la lixiviación debemos distinguir dos tipos de productos, materiales monolíticos o granulares.

- **Monolítico.** El “*The building materials decree*” de los Países Bajos define como material monolítico o consolidado, aquel cuya menor unidad volumétrica tiene como mínimo 50 cm<sup>3</sup> y tiene una forma fija y duradera en condiciones normales. Se considera consolidado estable aquel en que la pérdida de finos en el ensayo de difusión (NEN 7345) no es superior a 30 g/m<sup>2</sup>, en caso de hormigones a 28 días se tolera hasta una pérdida de 1500 g/m<sup>2</sup>, y a los 91 días 500g/m<sup>2</sup>. Consolidado no durable sería aquel que pierde el monolitismo por acción del medio.
- **Granular.** Se considera un material no consolidado o granular aquel que está formado por granos sueltos, la mayoría de las partículas, de tamaño inferior a 40 mm, sin forma fija permanente o duradera. La superficie considerada es muy grande en relación con el volumen. En algunos casos, un material granular puede estar compactado o cubierto con otro material adicional de baja permeabilidad, de tal forma que el comportamiento del material granular se asemeja más al de un material monolítico.

## 2.2 MECANISMOS DE LIXIVIACIÓN

La lixiviación implica la liberación y transporte de los componentes solubles de un material, por lo tanto, los mecanismos de lixiviación estarán íntimamente ligados a los mecanismos de transporte que presente el material.

Los mecanismos de transporte del líquido en el interior de un material están relacionados con la naturaleza y distribución de poros. Se conocen cuatro grandes mecanismos de lixiviación que dependen de la zona de contacto entre el material sólido y líquido.



- Lavado: Las partículas de la superficie del material en contacto con un líquido en circulación son disueltas y arrastradas o transportadas por el mismo líquido. No hay límite para la saturación de dicha disolución por renovación constante del líquido. El lavado es rápido. Si la superficie carece de poros, el caso del vidrio, el lavado es el único mecanismo de lixiviación a considerar.
- Difusión: Tiene lugar en caso de que el líquido o vapor penetra en el interior del material mediante su red porosa, abierta al exterior, y hay disolución de componentes del interior del material. En este tipo de fenómeno de transporte, el sentido de circulación del líquido tiene lugar por gradiente de concentraciones, de mayor a menor concentración, con tendencia al equilibrio. La fuerza motriz será la diferencia de concentraciones entre el líquido de los poros y la que fluye libremente. De esta forma pueden presentarse altas concentraciones en los lixiviados y reducirse fuertemente la velocidad de disolución, luego lixiviación.
  - o En los materiales granulares, al ser la longitud de los poros corta, el mecanismo de difusión carece de importancia. En cambio, en materiales monolíticos con longitud de poros considerable y expuesto a la infiltración del líquido es el mecanismo a tener en cuenta. Es un proceso lento.
- Percolación: Después de infiltrarse el agua en el material, ésta se mueve a través o rodeando las partículas del material por diferencia de presiones, arrastrando o disolviendo sustancias a su paso. Este movimiento puede ocurrir a nivel interno de la matriz, y está íntimamente ligado al grado de porosidad del material y longitud de estos. **Los materiales granulares suelen presentar este mecanismo de lixiviación.**
- Disolución-Erosión: Si el material considerado consta mayoritariamente de compuestos solubles, la matriz del material no frenará la entrada, ni la salida del líquido lixivante, y el proceso será muy rápido y continuará hasta el total desmoronamiento. La erosión superficial favorecerá la constante renovación de la superficie de ataque.

Los materiales monolíticos a menudo presentan un mecanismo de liberación de componentes controlado por difusión, mientras que los materiales granulares suelen presentar un mecanismo controlado por la percolación de agua a través del producto.

## 2.3 FACTORES DE LIXIVIACIÓN

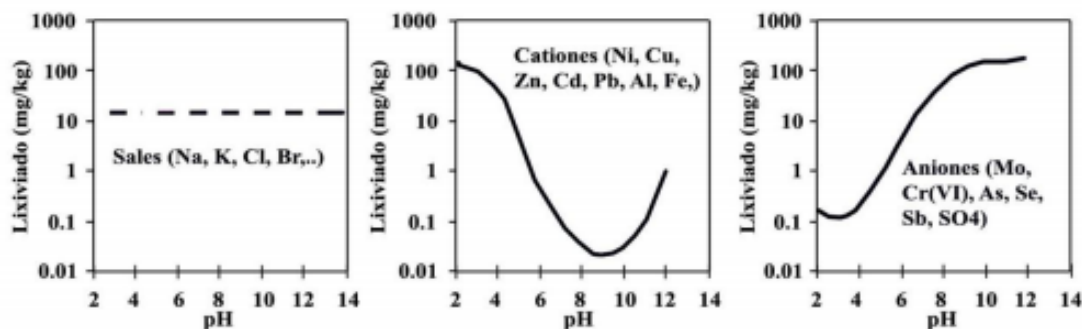
Se puede decir que el comportamiento frente a la lixiviación de todos los tipos de materiales se encuentra relacionado con factores críticos que afectan a esta. Estos factores están relacionados con parámetros intrínsecos del material, bien físicos o químicos, y a parámetros relacionados con el ambiente que lo rodea. Así, para poder predecir el comportamiento de lixiviación de un material en un escenario concreto, se deben conocer los procesos y factores que influyen en la lixiviación.

Con carácter general, los procesos causantes de la liberación de constituyentes del sólido hacia la fase acuosa se pueden englobar en dos grandes categorías, por un lado, procesos químicos (disolución de minerales, adsorción/desorción, disponibilidad) y por otro los procesos físicos de transporte. En la práctica la lixiviación de un material se da con la combinación de ambos. A continuación, se describen estos procesos y los factores que afectan a cada tipo de proceso general:

### 2.3.1 Factores químicos

- Mecanismos básicos químicos: Tres mecanismos químicos diferentes pueden dominar la liberación de contaminantes: disolución de un mineral (solubilidad), por procesos de adsorción/desorción o por la disponibilidad (contenido total) del constituyente en el producto.
- pH: El valor de pH, tanto del material como de su entorno, es un factor decisivo a tener en cuenta en el comportamiento de lixiviación. El valor de pH del fluido del entorno del material determina la máxima concentración en agua de cada constituyente a ese valor de pH. Cada material tiene su propia curva de liberación dependiente del valor de pH del entorno. Las diferentes curvas de liberación son muy similares y sistemáticas para diferentes grupos de elementos, sólo el valor absoluto varía entre diferentes materiales. Esto implica que el mecanismo de disolución de minerales es igual en todos los materiales, aunque por la relativa importancia de otros factores intrínsecos al propio material, la solubilidad de elementos puede variar entre estos. La gran importancia de este factor en la liberación de elementos se debe a que la disolución de la mayoría de los minerales y la adsorción son procesos pH dependientes.
- La siguiente figura muestra las curvas de liberación de diferentes grupos de constituyentes en función del pH. Se ha diferenciado cationes, aniones y sales por sus diferencias químicas, que muestran distinto patrón de comportamiento frente a la lixiviación. En general el agua ácida acelera la lixiviación de un hormigón, mientras que la alcalina, especialmente si contiene carbonatos, puede ser protectora.

Anexo IV. Imagen 1. Curvas de liberación de diferentes grupos de constituyentes en función del pH<sup>292</sup>



- Forma química del constituyente en el producto: Determina su comportamiento de lixiviación, los contaminantes pueden estar oxidados o reducidos (p.ej. el cromo puede estar presente en forma de  $\text{CrO}_4^{-2}$  o  $\text{Cr}^{+3}$ ). Los metales pesados tienden a unirse con sustancias húmicas naturales presentes en aguas naturales, suelos y materiales naturales de construcción (madera) formando complejos. Las

<sup>292</sup> Van der Sloot, H.A. y Dijkstra, J.J. 2004

formas complejas de metales pesados son altamente solubles y esto hace que sean liberados mucho más rápido que aquellos en forma no-compleja.

- Composición total del producto: La cantidad de cada elemento en la composición total del producto, mg de un elemento por cada kg de producto, tiene una influencia limitada. Las sales solubles constituyen la excepción a esta afirmación, puesto que la cantidad máxima lixiviada de las mismas a lo largo del tiempo suele ser muy similar a la cantidad total presente en el producto. La causa de liberación de los otros elementos suele estar principalmente motivada por mecanismos geoquímicos y factores físicos y, rara vez, las concentraciones en los lixiviados alcanzan el contenido total presente en el producto.
- Redox: El estado de oxidación/reducción del material o su ambiente influye en la forma química de un contaminante. Para metales pesados, la oxidación de un material inicialmente reducido favorece la cantidad del lixiviado, mientras que un estado de reducción tendrá el efecto contrario.
- Capacidad Buffer ácido-básico. Resistencia al cambio de pH. Esta propiedad en un material determina cómo evoluciona el pH a lo largo de un periodo bajo influencias de factores externos.
- Materia orgánica y DOC: La materia orgánica, sólida o disuelta, o las sustancias húmicas (llamadas también "DOC: dissolved organic carbon") está formada por moléculas complejas que tienen una elevada afinidad a enlazar los metales pesados. Así la presencia de DOC puede aumentar las concentraciones en los lixiviados en varios órdenes de magnitud.
- Composición de la fase acuosa y fuerza iónica. Generalmente la presencia de sales en el producto o en el entorno incrementa la lixiviación de contaminantes. Las formas complejas de los metales también favorecen la liberación, así como aquellos metales complejos con cloruros o carbonatos.
- Temperatura. Un aumento de la temperatura conduce a una mayor solubilidad, al aumento de reacciones químicas y al incremento del transporte por difusión.

### 2.3.2 Factores físicos

- Tamaño de partícula: Para materiales granulares, el tamaño de partícula determina la distancia que un contaminante debe recorrer desde el centro de la partícula a la fase acuosa. La reacción y el transporte es más rápida en materiales granulares con tamaño de partícula pequeña.
- Porosidad. El transporte de agua es más fácil en medios con alta porosidad, así generalmente una alta porosidad en el material (granular, monolítico) conduce a mayores liberaciones de constituyentes.
- Permeabilidad: La permeabilidad o conductividad hidráulica determina cómo de fácil el agua penetra en el producto, y consecuentemente la facilidad con la que los contaminantes son liberados a lo largo del tiempo. El agua tiende a rodear y no a penetrar en los materiales con baja permeabilidad, es por esto por lo que en materiales de baja permeabilidad la percolación o lavado es el mecanismo de transporte predominante.
- Tortuosidad: En materiales monolíticos, donde la liberación de contaminantes viene controlada por procesos de difusión, el factor específico que determina el grado de difusión es la tortuosidad. Se define como el ratio entre la distancia real que recorre un constituyente al ser transportado

internamente y la distancia en línea recta entre dichos puntos. Materiales con una estructura porosa interna en forma de canalización presentan valores de tortuosidad altos, que hace que la liberación de contaminantes sea baja.

- Forma y tamaño monolítico: La cantidad de sustancia lixiviada desde un producto por difusión depende principalmente del tamaño y geometría del producto. Estos factores están directamente vinculados con el área superficial expuesta del producto, así la superficie específica es un parámetro de gran relevancia para la difusión. El procedimiento de difusión es más rápido en los materiales con mayor superficie específica.
- Sensibilidad a la erosión: En materiales monolíticos la erosión/abrasión física tiene un efecto positivo en la liberación debido a dos factores. Primero, la erosión puede conducir a mayor área superficial. En segundo lugar, debido a la erosión, nueva superficie es expuesta, lo que conduce a mayor gradiente de concentraciones de contaminantes y una mayor liberación de estos.
- Intrusión de sales. Por ejemplo, la intrusión de cloruro en estructuras de hormigón armado conducirá a la oxidación del armado, incrementando el volumen de este, lo que hace fisurar el hormigón, incrementando el área superficial y consecuentemente facilitando la liberación o lixiviación de elementos.

### 2.3.3 Factores ambientales

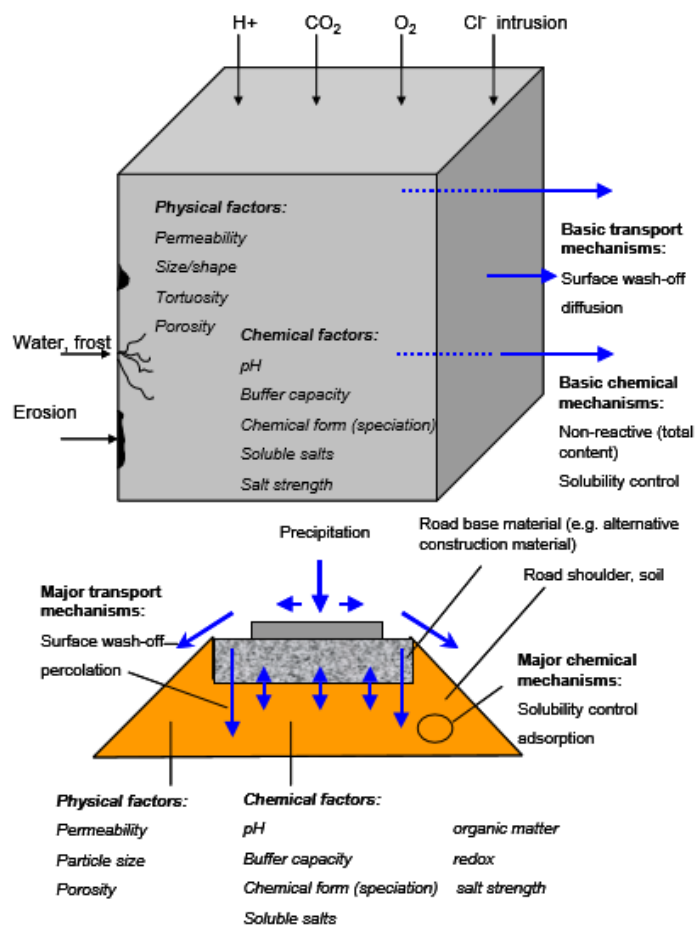
Algunos factores externos al material son importantes en el comportamiento de lixiviación. Muchos de ellos hacen referencia a la cantidad de agua a la que el material es expuesto durante un intervalo de tiempo, como es la velocidad de flujo, o la aparición de rutas de flujo en materiales granulares. Estos factores externos son parámetros dependientes del escenario donde se vaya a utilizar el material. A continuación, se mencionan los factores a tener en cuenta:

- Tiempo: es un factor importante a tener en cuenta para la cantidad liberada.  
En primer lugar, a la hora de predecir el comportamiento de lixiviación de un material, hay que definir bien la vida útil o el tiempo que va a transcurrir bajo el escenario de aplicación concreto. Además, hay que estimar los diferentes mecanismos de lixiviación que van a tener lugar a lo largo del tiempo y el envejecimiento del material y/o cambios de las condiciones ambientales. La carbonatación en el material produce como resultado una caída de pH, posibles cambios de estado de oxidación, así como en la superficie de adsorción. La acidificación supone también una disminución del pH del material debido a las reacciones con ácidos minerales u orgánicos. La oxidación o reducción pueden causar cambios de estados de oxidación: de Cr 6+ a Cr 3+, precipitación de sulfuros y cambios en las superficies de adsorción, de Fe<sup>3+</sup> a Fe<sup>2+</sup>. El envejecimiento del material puede ocasionar capas superficiales con efectos de sellado, pero también puede ocasionar fisuración, con lo que el área de contacto entre material y lixiviante aumenta. Los ensayos de lixiviación deben de ser capaces de proveer una visión de la lixiviación a corto y largo plazo, además de dar información para la interpolación o extrapolación de los resultados a periodos de lixiviación diferentes a los estipulados en los ensayos.
- Especificaciones geotécnicas de la aplicación.

- Hidrología del entorno. El régimen del medio lixivante, contacto del material con líquido estancado o en circulación con la superficie del material o penetración a través del material debido a un gradiente de presión. Las aguas estancadas (régimen estático), son mucho menos agresivas que las aguas en circulación, debido a que el gradiente de concentración en la superficie del material será menor que cuando la circulación del agua permite la renovación continua del medio lixivante fresco en la superficie del material.
- Ciclos de humedad-secado.
- Degradación de sustancias orgánicas en el material, o la degradación del material debido a la influencia de la luz.

En la siguiente figura se muestran los factores específicos del material y los factores externos (químicos y físicos) que influyen en la liberación de contaminantes de un material monolítico y un material granular, respectivamente.

Anexo IV. Imagen 2. Factores que influyen en la liberación de contaminantes en función del material<sup>293</sup>



<sup>293</sup> Fuente: H.A. van der Sloot and J.J. Dijkstra. 2004

## 2.4 ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN

La necesidad de evaluar el impacto ambiental que supone la gestión de un material o residuo requiere de métodos eficaces que cuantifiquen el impacto ambiental real a corto y largo plazo, en cada fase a lo largo de la vida útil del material.

En referencia al impacto ambiental provocado por la lixiviación, al no ser viable la medición continua de los lixiviados a escala real, los resultados de los ensayos de lixiviación deben proveer suficiente información del verdadero impacto que supone la utilización del material en cada escenario específico.

La **finalidad de los ensayos de lixiviación es simular el proceso de lixiviación**, de un determinado material bajo condiciones específicas a lo largo del tiempo, considerando todos los parámetros que afectan. Como la variabilidad de los parámetros a tener en cuenta es muy amplia, los actuales ensayos de lixiviación tienen en cuenta los más relevantes, como son:

- pH de lixiviación, que es combinación del pH del lixiviante y la capacidad neutralizadora del material.
- Tamaño de partícula o área expuesta al contacto con el lixiviante. En muchos estudios se deja constancia de la necesidad de mayor precisión en la definición de la preparación de la muestra en los ensayos UNE-EN 12457-2. En uno de los estudios consultados<sup>294</sup> se comprobó mediante la realización de este ensayo para el mismo material en dos laboratorios diferentes, que los resultados de las concentraciones de elementos contaminantes en los lixiviados diferían entre ambos, tal es así que uno de los laboratorios lo clasificaba como inerte, mientras que el otro lo clasificaba como peligroso. El trabajo concluye que la diferencia en la distribución del tamaño de partícula en la muestra es la causa de la diferencia en los resultados. En el laboratorio que clasificaba el material como inerte, se había discriminado la parte fina (20%; < 500 µm) de la muestra original.
- Composición del lixiviante.
- Relación entre el volumen de lixiviante y la masa de material (L/S, expresada normalmente en L/kg).
- Tiempo de contacto entre el líquido y el sólido.

Por otro lado, el modo de operación puede ser en continuo (el líquido fluye constantemente a través del sólido o del recipiente que lo contiene, como sucede en los ensayos de percolación en columna) o en discontinuo (batch, el líquido y el sólido permanecen en contacto un tiempo determinado en un sistema cerrado, como ocurre en los ensayos de difusión en tanque).

Asimismo, la relación líquido/sólido final se puede alcanzar en una o varias etapas, siendo en este caso la cantidad lixiviada total la suma acumulativa de la cantidad lixiviada en cada una de las etapas, como sucede en los ensayos de percolación en columna.

Dependiendo de los parámetros y del modo de operación, los ensayos se pueden clasificar en dos categorías:

---

<sup>294</sup> *Interpretation of standard leaching test BS EN 12457-2: is your sample hazardous or inert? Zandi, Mohammad, y otros, y otros. s.l.: Journal of Environmental Monitoring, 2007.*

- Ensayos en los que se alcanza la condición de equilibrio químico. Miden la lixiviación asociada a unas condiciones químicas específicas.
- Ensayos en los que no se alcanza la condición de equilibrio. En este caso la velocidad de transferencia de masa domina la lixiviación. Ésta depende de las características químicas y físicas intrínsecas del material.

Es fundamental destacar que las concentraciones determinadas en un lixiviado que se ha obtenido mediante un ensayo de lixiviación, **en general no se pueden relacionar directamente con el impacto de dicho material, pero estos resultados junto a otros estudios deben proporcionar información suficiente para adoptar decisiones respecto a su uso en una escala temporal.** La extrapolación de los resultados obtenidos en un ensayo de lixiviación a un escenario específico o a una escala temporal determinada se realiza mediante la aplicación de modelos hidrogeológicos más o menos complejos.

Básicamente, los pasos a seguir o la metodología recomendada para la evaluación de la lixiviación de un material son:

- Descripción de escenarios para diferentes aplicaciones.
- Selección y ejecución de ensayos para evaluar el comportamiento frente a la lixiviación de los materiales.
- Verificación de campo mediante ensayos de materiales (como el hormigón) expuestos al ambiente, durante años (50-200 años). Estudio de análogos naturales y análogos arqueológicos.
- Desarrollo de una aproximación para cuantificar el impacto en diferentes ciclos de vida de materiales de base cemento.

Para mayor eficiencia, se jerarquizan los ensayos de lixiviación por tipología de material (monolítico, granular), para así clasificar los ensayos como de caracterización del material, de conformidad, y de verificación “in-situ”.

De esta forma, **una combinación de ensayos de caracterización del comportamiento del material, junto a otros más simples de conformidad para verificar el cumplimiento de requisitos regulados en función del escenario de aplicación o con propósitos de control de calidad, proveen suficiente información del comportamiento del material y además disminuye el número y la complejidad de los ensayos a realizar en cada material específico.**

- Ensayos de caracterización básica: El objetivo de este tipo de ensayos es la caracterización básica del comportamiento de lixiviación del material. Los datos obtenidos permiten la identificación de los mecanismos dominantes y la determinación del rango esperado de lixiviación en aplicaciones específicas. Esto posibilita la definición de categorías de materiales en los que los mecanismos que controlan la lixiviación son comunes.
- 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 on-site: son ensayos rápidos, y no necesariamente de lixiviación, que se utilizan para comprobar que el material se comporta del mismo modo que en los ensayos de conformidad.

#### 2.4.1 Ensayos de caracterización básica

A partir del trabajo de armonización desarrollado por el Comité Técnico de caracterización de residuos de la Unión Europea (CEN/TC 292), se establecen tres tipos de ensayos de caracterización básica:

- Ensayos de dependencia de pH:

La prueba consiste en obtener paralelos lixiviados de un material (triturado/granulado) con una relación L/S de 10 L/kg durante 48 horas en una serie de valores predefinidos de pH. El rango de valores de pH a abarcar está comprendido entre 4 y 12, ambos inclusive, y la diferencia entre dos valores de pH consecutivos no puede sobrepasar de 1,5. Existen dos modos de operación para estos ensayos, con adición inicial de ácido o base (CEN/TS 14429:2005 (29)), o con control continuo del pH (CEN/TS 14997 (30)). Al ser el pH uno de los parámetros más influyentes en la lixiviación, **estos ensayos son fundamentales para la comprensión del comportamiento químico del contaminante.** Son de aplicación en cualquier tipo de material. La información puede utilizarse para:

- Identificación de la sensibilidad de la lixiviación a pequeños cambios de pH.
  - Proporciona información en condiciones de pH impuestas por influencias externas.
  - Base para la **comparación de las pruebas internacionales de lixiviación.**
  - Base para la modelización de especiación geoquímica.
  - Proporciona información sobre capacidad de neutralización de ácido/base.
  - Comparación mutua de diferentes materiales para evaluar similitudes en el comportamiento de lixiviación.
  - Reconocimiento de factores de control en la liberación.
- Ensayo de columna o percolación:

En este ensayo un flujo ascendente se hace pasar a través de un material granular (tamaño de partícula <4mm compactado) en una columna de dimensiones fijadas. La lixiviación se lleva a cabo con agua desionizada a su pH natural (entre 5 y 7,5) de manera que **el material impone su pH a la solución lixiviada.** Se recogen siete fracciones de eluato hasta una L/S total acumulativa de 10 L/kg. Las relaciones de L/S de los diferentes lixiviados son: dos a 0,1 L/kg, una de 0,3 L/kg, 0,5 L/kg, 1 L/kg, 3 L/kg y 5 L/kg. El ensayo **es practicable en muchos materiales granulares, con excepción de aquellos con baja permeabilidad**, como pueden ser los suelos arcillosos o sedimentaciones. El ensayo estandarizado en Europa es CEN/TS 14405. La información obtenida permite:

- Identificación del control de solubilidad frente al lavado.
- Indicación de las concentraciones en el agua de los poros del material, dato de interés para los lixiviados de campo de baja relación L/S.
- Equilibrio local establecido muy rápidamente
- Base para la modelización de especiación geoquímica



- Permite la comparación con datos de campo y con lisímetros, siempre y cuando las relaciones L/S de las diferentes fracciones se puedan obtener en tales mediciones.
  - Posibilita la proyección del comportamiento a largo plazo.
- Ensayo de difusión o monolítico.

En la prueba un material monolítico es sometido a lixiviación en un tanque cerrado para evaluar el área superficial relacionada con la liberación. El agua desmineralizada del lixivante se renueva después de 8 horas y 1, 2, 4, 9, 16, 36, 64 días. La relación entre lixivante y el volumen del material (L/V) es de 5. El ensayo estandarizado en Europa es el CEN/TC 292/WG6-NWIP "Tank leach test" con similitudes a la NEN 7375 (Determinación de la lixiviación de componentes inorgánicos de materiales monolíticos de construcción y de residuos con la prueba de difusión) y otras normas nacionales (Francia, Austria y países nórdicos). Es de aplicación en materiales monolíticos de construcción. Existe una versión de este ensayo, The Compacted Granular Leach Test (CGLT), para materiales granulares con comportamiento monolítico bajo escenario de estudio, como pueden ser los suelos arcillosos o sedimentaciones. Los resultados se expresan en mg/m<sup>2</sup>. Las ventajas de este tipo de ensayos son:

- Relevante para los materiales con carácter monolítico (materiales duraderos) o materiales que se comportan como monolito (suelo de baja permeabilidad y de los sedimentos).
- Identificación de la solubilidad en comparación con la lixiviación dinámica posible.
- Aislamiento de los efectos del lavado de la superficie.
- La cuantificación de los parámetros intrínsecos de liberación.
- Establece las bases para la modelización reactiva y del transporte.
- Es posible la proyección del comportamiento a largo plazo.

Para la prueba de dependencia del pH y las pruebas de percolación, los resultados se expresan preferentemente en **mg de sustancia lixiviada por kg de materia sólida seca (unidades de liberación)**.

Los resultados también pueden expresarse **en forma de concentración (mg/l)** cuando sea necesario para aspectos específicos (por ejemplo, la evaluación del control de la solubilidad). La razón de presentar los datos de esta forma es que permite comparar los resultados para diferentes relaciones L/S (la cantidad de agua en contacto con el producto, expresada en L/kg) para grupos de constituyentes que muestran un comportamiento de liberación similar (sales, así como liberación controlada por solubilidad). Además, **permite comparar directamente los resultados de la prueba de percolación con los de una prueba de dependencia del pH.**

Hay que tener en cuenta que, por lo general, las concentraciones en el eluato de una lixiviación no pueden relacionarse directamente con el impacto del suelo, las aguas subterráneas o las aguas superficiales. **El eluato de una prueba de lixiviación refleja la liberación en las condiciones impuestas en la prueba.** En una situación real, por ejemplo, la "primera descarga" hasta L/S=0,1 o hasta L/S=0,5 puede tener concentraciones mucho más altas y puede ser de mucha más importancia para los organismos, que la liberación después de un período más largo. Además, hay que tener en cuenta que muchas sustancias lixiviadas pueden ser adsorbidas primero por las partículas del suelo y ser transportadas posteriormente a las aguas subterráneas. Por lo tanto,

las concentraciones de las sustancias en un eluato procedente directamente de un ensayo serán a menudo muy diferentes de las concentraciones de las sustancias en el percolado que entra en las aguas subterráneas.

El patrón de lixiviación obtenido con el ensayo de dependencia del pH es el resultado de una combinación de los factores químicos específicos del material que controlan la liberación, como la presencia de sales en el producto, las propiedades redox, la capacidad de amortiguación (medida implícitamente en el ensayo de dependencia del pH), la fuerza iónica y la especiación química. **El resultado de la prueba también permite extrapolar el resultado a condiciones de campo relevantes, como lo que ocurre con la liberación cuando el material se expone a diferentes condiciones ambientales.** Por lo general, la prueba de dependencia del pH se realiza con agua desmineralizada, pero el método de prueba también puede ser adecuado para otros lixiviantes relevantes, como el agua de mar, si fuera necesario.

El resultado de una prueba de dependencia del pH dice mucho sobre las **cantidades que se espera que se liberen en diferentes condiciones de exposición.** Un producto expuesto a suelos naturales pobres en caliza generalmente muestra una mayor liberación que un producto expuesto a un suelo rico en caliza, lo que es principalmente un efecto del pH. El pH natural al que un producto libera constituyentes se compone en parte del pH del propio producto y de su capacidad tampón (capacidad de neutralizar ácidos)

Los resultados del ensayo de tanque para materiales monolíticos suelen expresarse en  $\text{mg/m}^2$  (acumulados) frente al tiempo (días), ya que la liberación (controlada por difusión) está relacionada con la superficie del producto y el tiempo de exposición.

A modo informativo, a continuación, se presentan las conclusiones obtenidas en la tesis<sup>295</sup> que se ha consultado como referencia al comparar los resultados obtenidos en distintos ensayos de lixiviación, tales como el de conformidad, utilizado para el control del material; el de percolación para caracterizar el comportamiento de la aplicación dada al material y el ensayo de dependencia de pH que tiene en cuenta los factores impuestos por el entorno en el cual será utilizado el material.

La comparación da como resultado que, las concentraciones acumuladas de las diferentes fracciones obtenidas en el ensayo de percolación, en general, están por encima de las concentraciones obtenidas para el ensayo de conformidad y de dependencia pH en condiciones neutras. Por otro lado, las concentraciones de los lixiviados neutros del ensayo de dependencia pH están por el orden del doble de las obtenidas en el ensayo de conformidad.

El ensayo de percolación, CEN/TS 14405, es entre los realizados el más adecuado para caracterizar el comportamiento de lixiviación de material granular en capa no ligadas. Tiene en cuenta la disolución del material, provee información de los diferentes mecanismos de liberación y las concentraciones obtenidas en el laboratorio se pueden extrapolar en el tiempo mediante la relación L/S.

---

<sup>295</sup> *Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis de Máster. Estudio del impacto ambiental por lixiviación de la escoria de acería en capas granulares no ligadas 706-TFM-314 Autor Karmele Otegi Aldai. 2012*

El ensayo de percolación de flujo ascendente (se realiza con una columna llena de material granular (<4 mm), por la que se hace pasar secuencialmente agua acidificada aumentando la relación L/S ( $L/S = 0,1$  a  $10$ ). El líquido de lixiviación se hace circular desde la parte inferior de la columna hacia la parte superior para minimizar la creación de canales y taponamiento de la columna y proporcionar un mejor control del caudal.

La Prueba de Percolación de Flujo Ascendente (Upflow Percolation Test) tiene por objeto determinar la tasa de lixiviación de contaminantes en función de la relación entre líquido y sólido, particularmente para relaciones L/S bajas que son las que prevalecen en la realidad.

En una de las referencias<sup>296</sup> consultadas se señala que el ensayo de lixiviación por percolación en columna imita el comportamiento de percolación, dependiente del tiempo, de los sólidos. Aunque los ensayos de percolación en columna se realizan en laboratorios, se asemejan más a las condiciones naturales que cualquier otro ensayo y proporcionan resultados más sólidos que los ensayos por lotes.

El ensayo de conformidad, EN-12457, tiene la ventaja de ser un ensayo fácil y rápido, pero estas ventajas conllevan la falta de información. Por otro lado, la posibilidad que ofrece la legislación actual de vertederos de comparar los resultados del ensayo de conformidad o la fracción 1 del ensayo de percolación con los límites correspondientes, es poco fiable en los elementos donde el mecanismo de liberación no es el lavado.

El ensayo de dependencia pH, CEN/TS 14429, aporta información del comportamiento de lixiviación del material en aquellos escenarios donde el entorno impone las condiciones de pH. Aun así, la ejecución de este ensayo es compleja, puede haber materiales, donde la necesidad de bajar el valor de pH a valores requeridos por la norma se aleje de la realidad del escenario específico. Esto es, que en el entorno no haya una fuente que genere la cantidad de ácido necesaria para bajar los lixiviados a tales valores de pH. Además, el análisis de los eluatos acidificados requiere técnicas especiales. Por lo comentado, la aplicación de dicho ensayo queda justificada en aquellos casos donde las condiciones del ambiente sean tan agresivas que se imponen a las características del propio material.

#### 2.4.2 Ensayos de conformidad

Los ensayos de cumplimiento tienen la finalidad de comprobar si un material (aún) cumple con las regulaciones o con el comportamiento de un material o un grupo de materiales de referencia. Este tipo de ensayos se caracteriza por su simplicidad y rapidez, lo cual implica ventajas prácticas y financieras. **Una vez que el comportamiento de liberación del material ha sido evaluado por los ensayos de caracterización**, es suficiente comprobar que el material aún sigue cumpliendo este comportamiento mediante este tipo de ensayo. Entre ellos destacan los pertenecientes a la serie EN 12457/1-4, Granular waste compliance leaching test. En estos ensayos el material granular se expone a un lixivante, agua desionizada sin ajuste de pH, durante un periodo de tiempo necesario (24 h) para establecer el equilibrio.

---

<sup>296</sup> Yasutaka T, Naka A, Sakanakura H, et al. Reproducibility of up-flow column percolation tests for contaminated soils. *PLoS One*. 2017;12(6): e0178979. Published 2017 Jun 5. doi:10.1371/journal.pone.0178979

La norma EN 12457 tiene por objeto evaluar la lixiviabilidad de los residuos en condiciones de extracción suaves para evaluar la eliminación de residuos en vertedero o para su reutilización como material. Cuando se utiliza más de uno de los procedimientos del ensayo, el analista puede estimar un plazo relativo para la liberación de contaminantes si se compara con la disponibilidad para la lixiviación. El ensayo se centra en la liberación por difusión a partir de materiales granulares, un fenómeno que se observa cuando los materiales de grano fino están rodeados por partículas más gruesas, o cuando los materiales se compactan a una baja permeabilidad (van der Sloot, et al., 1994).

En el documento del JRC<sup>297</sup> se señala que, en el caso de un material granular grueso con una baja porosidad interna y una baja permeabilidad, el agua fluiría alrededor del material en lugar de atravesarlo por lo que podría ser adecuado este tipo de ensayos. Para materiales granulares de alta porosidad interna, sería más adecuado una percolación en columna.

- Parte 1: L/S = 2 L/kg, tamaño de las partículas < 10 mm
- Parte 2: L/S = 10 L/kg, tamaño de las partículas < 4mm
- Parte 3: L/S = 2 y 8 L/kg, tamaño de las partículas < 4mm
- Parte 4: L/S = 10 L/kg, tamaño de las partículas < 10 mm

### 2.4.3 Ensayos de verificación/control de calidad

Este tipo de ensayos tiene el propósito de determinar de forma rápida si el material cumple con el comportamiento determinado o esperado definido con anterioridad en el escenario concreto de aplicación. Estos tipos de ensayo sólo pueden dar una impresión en algunos puntos específicos.

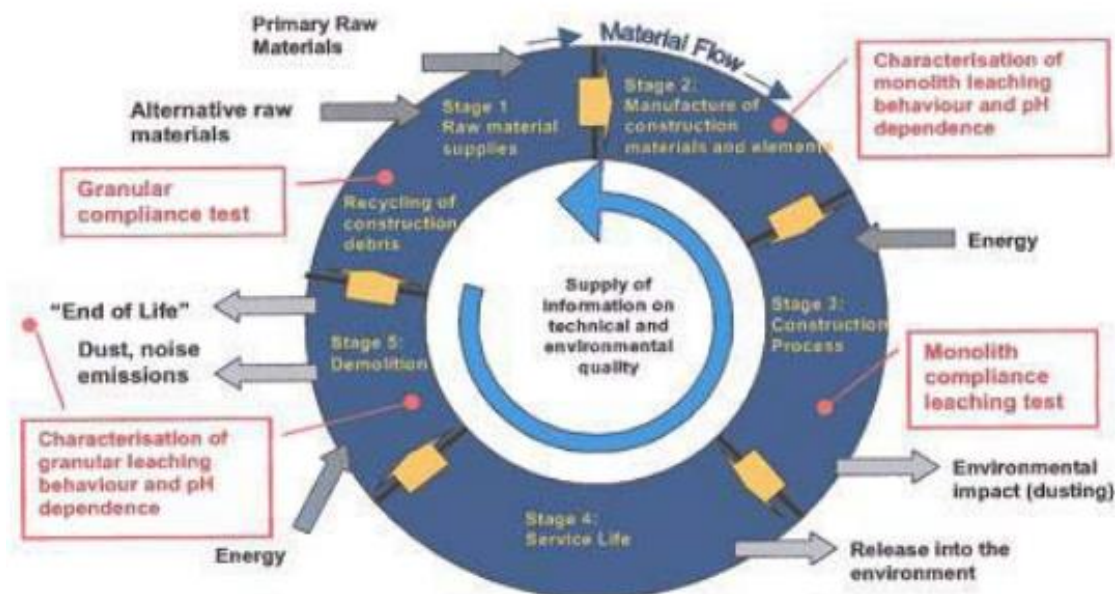
El paso básico de **caracterización** en la jerarquía de pruebas debe incluir la medición de los parámetros clave anteriormente enumerados. Las pruebas de conformidad y de verificación sobre el terreno para la práctica diaria (el segundo y el tercer paso de la jerarquía,) pueden realizarse con menos mediciones; por ejemplo, sólo pueden interesar el pH y la concentración de las sustancias. Es importante tener en cuenta que no es necesario medir todos los parámetros cada vez cuando otras investigaciones anteriores han caracterizado ciertos aspectos típicos del comportamiento de lixiviación de un determinado material (como un alto potencial redox).

En la figura siguiente se presenta un ejemplo de los diferentes ensayos utilizados para la evaluación del ciclo de vida de los materiales de la construcción. La figura ilustra la evaluación de las materias primas, una evaluación de los materiales antes del proceso de producción total, el control de calidad de los productos comerciales, la evaluación de los materiales reciclados, y la toma de decisión de si el material continúa siendo válido para la aplicación, o ha alcanzado la condición de “final de vida”.

---

<sup>297</sup> 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,

Anexo IV. Imagen 3. Ejemplo de los ensayos utilizados en las distintas etapas del ciclo de la construcción<sup>298</sup>



## 2.5 TIPOS DE ENSAYOS DISPONIBLES.

Se pueden englobar en dos categorías generales<sup>299</sup>:

- Extracción única/por lotes (a veces se denominan ensayos estáticos)
- Extracción múltiple/de flujo continuo (a veces se denominan ensayos dinámicos)

### 2.5.1 Ensayos de extracción única

Los **ensayos de extracción única** incluyen todos los ensayos en los que se pone en contacto una cantidad determinada de líquido de lixiviación con una cantidad específica de residuos durante un período de tiempo establecido, sin renovación del líquido de lixiviación. El lixiviado resultante se retira, ya sea en varios momentos del ensayo para obtener información cinética (concentraciones que varían con el tiempo) o, más comúnmente, al final de la prueba, y luego se analiza.

Al realizar una sola prueba de extracción, se parte de la base de que al final del período de prueba **se ha alcanzado una condición de estado estable (equilibrio), aunque no necesariamente sea así en la práctica.** Alcanzar el equilibrio en las pruebas de lixiviación de extracción única es fundamental para predecir el comportamiento de lixiviación durante largos períodos de tiempo. Si las pruebas no se realizan en condiciones de equilibrio, el comportamiento de lixiviación no alcanza su potencial real, y las predicciones del comportamiento de lixiviación a largo plazo se basarán en concentraciones de lixiviación demasiado bajas

<sup>298</sup> Van der Sloot 2003

<sup>299</sup> An Assessment of Laboratory Leaching Tests for Predicting the Impacts of Fill Material on Ground Water and Surface Water Quality --A Report to the Legislature--December 2003. Washington Department of Ecology.

o altas (EQM, 1998). Los siguientes ensayos se incluyen dentro de los ensayos de lixiviación de extracción única:

- EN 12457/1-4, Compliance Test for Granular Waste Materials and Sludges
- NEN 7341, Availability Test
- ASTM D 3987, Standard Test Method for Shake Extraction of Solid Waste with Water
- ASTM D 6234 (ASTM, 2002), Standard Method for Shake Extraction of Mining Waste by the Synthetic Precipitation Leaching Procedure
- SPLP, Synthetic Precipitation Leaching Procedure
- TCLP, Toxicity Characteristic Leaching Procedure
- DRET, Dredge Elutriate Test
- SET, Standard Elutriate Test

### 2.5.2 Ensayos de extracción múltiple

Los **ensayos de extracción múltiple** renuevan continua o intermitentemente el fluido de lixiviación y así mantener una fuerza motriz para que se produzca la lixiviación. Las pruebas de extracción múltiple proporcionan información sobre la cinética de la movilización de contaminantes.

Existen tres tipos de ensayos de extracción múltiple:

- Ensayos por lotes en serie.
- Ensayos de flujo envolvente
- Ensayos de flujo continuo.

En los ensayos por lotes en serie, se mezcla una porción de muestra granular con el líquido de lixiviación con una relación L/S establecida y se agita durante un período de tiempo determinado. El lixiviado se separa de los sólidos y se reemplaza con un fluido de lixiviación nuevo hasta que se haya completado el número deseado de lotes. Los datos de estas pruebas pueden utilizarse para inferir la liberación temporal de componentes lixiviables. Los siguientes ensayos se incluyen dentro de los ensayos en serie por lotes son:

- ASTM D 4793, Standard Test Method for Sequential Batch Extraction of Waste with Water
- ASTM D 5744, Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Modified Humidity Cell
- SBLT, Sequential Batch Leachate Test

Los ensayos de flujo envolvente se aplican generalmente a muestras monolíticas. La muestra se coloca en el recipiente de muestreo y se añade líquido de lixiviación. El flujo de líquido de lixiviación alrededor de los residuos proporciona la fuerza motriz para que la lixiviación se produzca. Los siguientes ensayos se incluyen dentro de los ensayos de flujo envolvente

- NEN 7345, Tank Leach Test -NEN 7375

En un ensayo de flujo continuo, el líquido de lixiviación se hace pasar, ya sea en forma intermitente o continua, a través de un recipiente abierto lleno de una muestra sólida porosa. El lixiviado es muestreado

periódicamente y analizado. Los resultados se utilizan para examinar la liberación de contaminantes a lo largo del tiempo y en función de la relación L/S. Existen dos tipos de pruebas de flujo: ensayos con lisímetro y ensayos de columna, que difieren principalmente en tamaño y duración. Los siguientes ensayos se incluyen dentro de los ensayos de flujo continuo:

- UNE- EN 14405, Upflow percolation test
- NEN 7343, Column Test-NEN 7373
- ASTM D 4874, Standard Test Method for Leaching Solid Waste in a Column Apparatus
- PCLT, Pancake Column Leachate Testing.

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*



## **ANEXO V. MÉTODOS DE ENSAYO NORMALIZADOS**

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

## **Métodos de ensayo normalizados**

En la siguiente tabla se resumen los métodos de ensayo normalizados que los distintos EEMM identificados requieren en sus respectivas normativas analizadas en el presente estudio para el análisis de cada uno de los parámetros propuestos.

El laboratorio debe confirmar que puede aplicar correctamente los métodos normalizados previo a su uso en ensayos o calibraciones. Cualquier variación en el método normalizado debe implicar la repetición de dicha confirmación.

**Anexo V. Tabla I. Métodos de ensayo normalizados<sup>300</sup>.**

| Parámetro        | Método de ensayo                    | Método de ensayo alternativo | Método de ensayo                                     | Método de ensayo |
|------------------|-------------------------------------|------------------------------|--|------------------|
|                  | Francia                             | Francia                      | Alemania   | Países Bajos     |
| Arsénico (As)    | UNE-EN ISO 11885 o UNE-EN ISO 11969 | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NVN 7323         |
| Bario (Ba)       | UNE-EN ISO 11885                    | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NEN 6964         |
| Cadmio (Cd)      | UNE-EN ISO 11885 o ISO 8288         | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NEN 6964         |
| Cromo total (Cr) | UNE-EN ISO 11885                    | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NEN 6964         |
| Cromo (VI)       | UNE -EN 15192                       | UNE-EN ISO 18412             | UNE -EN 15192  | -                |
| Cobre (Cu)       | UNE-EN ISO 11885 o ISO 8288         | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NEN 6964         |
| Mercurio (Hg)    | UNE-EN 1483                         | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o UNE-EN 16175 o UNE-EN ISO 12846 | NVN 7324         |
| Molibdeno (Mo)   | UNE-EN ISO 11885                    | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NEN 6964         |
| Níquel (Ni)      | UNE-EN ISO 11885 o ISO 8288         | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NEN 6964         |
| Plomo (Pb)       | UNE-EN ISO 11885 o ISO 8288         | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NEN 6964         |
| Antimonio (Sb)   | UNE-EN ISO 11885                    | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NVN 7323         |
| Selenio (Se)     | UNE-EN ISO 11885                    | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NVN 7323         |
| Zinc (Zn)        | UNE-EN ISO 11885 o ISO 8288         | UNE-EN ISO 17294-2           | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NEN 6964         |
| Vanadio (V)      | -                                   | -                            | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NEN 6964         |
| Cobalto (Co)     | -                                   | -                            | UNE-EN ISO 17294-2 o ISO 22036                       | NEN 6964         |

<sup>300</sup> La mayoría de los laboratorios acreditados por ENAC que analizan los lixiviados de residuos según norma UNE-EN 12457, utilizan como método de ensayo para metales la UNE-EN ISO 11885 o UNE-EN ISO 17294-2. Para cloruros, fluoruros y sulfatos Métodos internos basados en [UNE-EN 10304-1](#)

| Parámetro   | Método de ensayo                         | Método de ensayo alternativo | Método de ensayo   | Método de ensayo   |
|-------------|--|------------------------------|--------------------|--------------------|
|             | Francia                                  | Francia                      | Alemania           | Países Bajos       |
| Estaño (Sn) | -  | -                            | -                  | NEN 6964           |
| Bromo (Br)  | -  | -                            | -                  |                    |
| Cloruros    | UNE-EN ISO 10304-1 y 2 o<br>UNE-ISO 9297 | -                            | -                  | UNE-EN ISO 10304-1 |
| Fluoruros   | UNE-EN ISO 10304-1 o<br>ISO 10359        | -                            | UNE-EN ISO 10304-1 | -                  |
| Sulfatos    | UNE-EN ISO 10304-1 y 2                   | -                            | UNE-EN ISO 10304-1 | -                  |

## **ANEXO VI. VALORES LÍMITE DE LIXIVIACIÓN ESTABLECIDOS EN LA NORMATIVA DE VALORIZACIÓN DE ESCORIAS DE LAS CCAA Y DE LOS EEMM REVISADOS**

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

Valores límite de lixiviación

| País (método de ensayo) | País Vasco (UNE-EN 12457-4- L/S 10 l/kg) |                | Cantabria (UNE-EN 12457-4-L/S 10 l/kg) | Cataluña (UNE-EN 12457-4-L/S 10 l/kg) | Francia (NF-EN 12457-4-L/S 10 l/kg) |                |                | Países Bajos (NEN 7373 - ensayo de percolación - L/S de 0,1 a 10 l/kg) |                    |                       | Flandes (CMA 2/II/A.9.1 - ensayo de percolación L/S de 0,1 a 10 l/kg) | Alemania (DIN 19528 o 19529- ensayo de percolación L/S 2 l/kg) |             |             |             |             |             | Italia (UNE-EN 1744-3- L/S 10 l/kg)* | Suiza (ensayo de percolación L/S 0,25, 3 y 6 l/kg) |                 |
|-------------------------|--|----------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|--|--------------------|-----------------------|---|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------------|--|-----------------|
|                         | Parámetro                                | Tipo 2 (mg/kg) | Tipo 3 (mg/kg)                         | V.Límite (mg/kg)                      | V.Límite (mg/kg)                    | Tipo 1 (mg/kg) | Tipo 2 (mg/kg) | Tipo 3 (mg/kg)   | Conformado (mg/m2) | No conformado (mg/kg) | No conformado IBC (mg/kg)   | V.Límite (mg/kg)   | SWS1 (mg/l) | SWS2 (mg/l) | SWS3 (mg/l) | CUM1 (mg/l) | CUM2 (mg/l) | CUM3 (mg/l)                          | V.Límite (mg/l)                                    | V.Límite (mg/l) |
| Frecuencia de muestreo  |  |                |  |                                       | mensual, trimestral o semestral     |                |                |  |                    |                       |   |  |             |             |             |             |             |                                      |  | -               |
| pH                      | -  | -              | -                                      | -                                     | -                                   | -              | -              | -  | -                  | -                     | -   | 9-13   | 9-13        | 9-13        | 6-10        | 6-10        | 6-10        | 9-13                                 | 10   |                 |
| Arsénico (As)           | 0,5                                      | 0,6            | 0,5                                    | 0,5                                   | 0,6                                 | 0,6            | 0,6            | 260  | 0,9                | 2                     | 0,8   | -  | -           | -           | 0,055       | 0,065       | 0,11        | 0,05                                 | 0,1  |                 |
| Bario (Ba)              | 20                                       | 25             | 20                                     | 20                                    | 36                                  | 25             | 25             | 1.500  | 22                 | 100                   | -   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 1                                    | 5  |                 |
| Cadmio (Cd)             | 0,04                                     | 0,05           | 0,04                                   | 0,04                                  | 0,05                                | 0,05           | 0,05           | 3,8  | 0,04               | 0,06                  | 0,03  | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 0,005                                | 0,1  |                 |
| Cromo total (Cr)        | 0,5                                      | 2              | 0,5                                    | 0,5                                   | 4                                   | 2              | 0,6            | 120  | 0,63               | 7                     | 0,5   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 0,05                                 | 2  |                 |
| Cromo (VI)              | 0,1                                      | 0,4            | -                                      | -                                     | 1,2                                 | 0,6            | -              | -  | -                  | -                     | -   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | -                                    | -  |                 |
| Cobre (Cu)              | 2  | 3              | 2                                      | 2                                     | 3                                   | 3              | 3              | 98   | 0,9                | 10                    | 0,5   | 0,11   | 0,19        | 0,25        | 0,055       | 0,11        | 0,23        | 0,05                                 | 0,5  |                 |
| Mercurio (Hg)           | 0,01                                     | 0,01           | 0,01                                   | 0,01                                  | 0,01                                | 0,01           | 0,01           | 1,4  | 0,02               | 0,08                  | 0,02  | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 0,001                                | 0,01   |                 |
| Molibdeno (Mo)          | 0,5                                      | 2,8            | 0,5                                    | 0,5                                   | 5,6                                 | 2,8            | 0,6            | 144  | 1                  | 15                    | -   | 0,055  | 0,4         | 1           | 0,11        | 0,11        | 0,4         | 0,15                                 | -  |                 |
| Níquel (Ni)             | 0,4                                      | 0,5            | 0,4                                    | 0,4                                   | 0,5                                 | 0,5            | 0,5            | 81   | 0,44               | 2,1                   | 0,75  | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 0,01                                 | 2  |                 |
| Plomo (Pb)              | 0,5                                      | 0,6            | 0,5                                    | 0,5                                   | 0,6                                 | 0,6            | 0,6            | 400  | 2,3                | 8,3                   | 1,3   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 0,05                                 | 1  |                 |
| Antimonio (Sb)          | 0,06                                     | 0,08           | 0,06                                   | 0,06                                  | 0,08                                | 0,08           | 0,08           | 8,7  | 0,32               | 0,7                   | -   | -  | -           | -           | 0,025       | 0,025       | 0,055       | -                                    | -  |                 |
| Selenio (Se)            | 0,1                                      | 0,4            | 0,1                                    | 0,1                                   | 0,5                                 | 0,4            | 0,1            | 4,8  | 0,15               | 3                     | -   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 0,01                                 | -  |                 |
| Zinc (Zn)               | 4  | 5              | 4                                      | 4                                     | 5                                   | 5              | 5              | 800  | 4,5                | 14                    | 2,8   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 3                                    | 10   |                 |
| Cloro (Cl)              | 800                                      | 5.000          | 800                                    | 800                                   | 10.000                              | 5.000          | 1.000          | 110.000  | 616                | 8.800                 | -   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | -                                    | 2  |                 |
| Flúor (F)               | 18                                       | 30             | 10                                     | 18                                    | 60                                  | 30             | 13             | 2.500  | 55                 | 1.500                 | -   | 1,1  | 4,7         | 8,7         | -           | -           | -           | 1,5                                  | -  |                 |
| Sulfato                 | 1.000                                    | 5.000          | 1.000                                  | 1.000                                 | 10.000                              | 5.000          | 1.300          | 165.000  | 2.430              | 20.000                | -   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | -                                    | -  |                 |
| Vanadio (V)             | 1,5                                      | 4              | -                                      | -                                     | -                                   | -              | -              | 320  | 1,8                | 20                    | -   | 0,18   | 0,45        | 1           | -           | -           | -           | 0,25                                 | -  |                 |
| Cobalto (Co)            | -  | -              | -                                      | -                                     | -                                   | -              | -              | 60   | 0,54               | 2,4                   | -   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 0,25                                 | -  |                 |
| Berilio (Be)            | -  | -              | -                                      | -                                     | -                                   | -              | -              | -  | -                  | -                     | -   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 0,01                                 | -  |                 |
| Índice de fenol         | -  | -              | 1                                      | 1                                     | -                                   | -              | -              | -  | -                  | -                     | -   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | -                                    | -  |                 |
| COD                     | -  | -              | 500                                    | 500                                   | -                                   | -              | -              | -  | -                  | -                     | -   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | 30                                   | -  |                 |
| STD                     | -  | -              | 4.000                                  | 4.000                                 | -                                   | -              | -              | -  | -                  | -                     | -   | -  | -           | -           | -           | -           | -           | -                                    | -  |                 |

\*Italia ha aprobado recientemente UNI/PdR 94:2020 para la preparación de la muestra de escoria negra que se someterá a la prueba de lixiviación según la norma UNI EN 12457

Escoria negra: Regulada por todos. Alemania (SWS1, SWS2, SWS3).

Escoria de SIMn y escoria blanca: Regulada por Cantabria y Flandes.

Escoria de cobre: Regulada por Flandes, Países Bajos y Alemania (CUM1, CUM2, CUM3).

| Valores límite de contenido. Compuestos inorgánicos |            |         |         |
|---|------------|---------|---------|
| País  | País Vasco | Flandes | Suiza   |
| Parámetro   | (mg/kg)    | (mg/kg) | (mg/kg) |
| Arsénico (As)                                       | 30         | 250     | -       |
| Cadmio (Cd)   | 5          | 10      | 10      |
| Cromo total (Cr)                                    | 10.000     | 1.250   | 4.000   |
| Cromo (VI)  | 8          | -       | -       |
| Cobre (Cu)  | 10.000     | 375     | 3.000   |
| Mercurio (Hg)                                       | 4          | 5       | -       |
| Molibdeno (Mo)                                      | 75         | -       | -       |
| Níquel (Ni)   | 110        | 250     | 500     |
| Plomo (Pb)  | 120        | 1.250   | 1.000   |
| Zinc (Zn)   | 10.000     | 1.250   | 6.000   |
| Vanadio (V)   | 1.000      | -       | -       |

Los valores de contenido del País Vasco, coinciden con los NGR "Otros usos" de esa CCAA salvo para el Cromo, Cobre, Zinc y Vanadio.

| Valores límite de contenido. Compuestos orgánicos |         |              |
|---|---------|--------------|
| País  | Flandes | Países Bajos |
| Parámetro   | (mg/kg) | (mg/kg)      |
| Benceno   | 0,5     | 1            |
| Etilbenceno                                       | 5       | 1,25         |
| Estireno  | 2       | -            |
| Tolueno   | 15      | 1,25         |
| Xileno  | 15      | 1,25         |
| Benzo(a)antraceno                                 | 35      | 40           |
| Benzo(a)pireno                                    | 8,5     | 10           |
| Benzo(ghi)perileno                                | 35      | 40           |
| Benzo(b)fluoranter                                | 55      | -            |
| Benzo(k)fluoranter                                | 55      | -            |
| Criseno   | 400     | 10           |
| Fenantreno  | 30      | 20           |
| Fluoranteno                                       | 40      | 35           |
| Indeno  | 35      | 40           |
| Naftaleno   | 20      | 5            |
| Hexano  | 1       | -            |
| Heptano   | 25      | -            |
| HAP total   | -       | 50           |
| Aceite mineral                                    | 1.000   | 500          |
| Octano  | 90      | -            |
| PCB   | 0,5     | 0,5          |
| Fenol   | -       | 1,25         |
| Antraceno   | -       | 10           |
| Amianto   | -       | 100          |

Ambos países consideran diferentes residuos como materiales de construcción. Ese puede ser el motivo de limitar parámetros orgánicos ya que según indicaciones de País Vasco las escorias proceden de un proceso térmico en el que se produce la combustión completa de los compuestos orgánicos.

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*



## **ANEXO VII. RESUMEN DE LOS REQUISITOS REGULADOS EN LAS NORMAS DE VALORIZACION DE ESCORIAS DE PAÍS VASCO, CATALUÑA Y CANTABRIA**

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

| País   | País Vasco  |   |   | Cantabria   | Cataluña  |
|--|---|---|---|---|---|
| Norma/Régimen jurídico                         | Decreto 64/2019, de 9 de abril, del régimen jurídico aplicable a las actividades de valorización de escorias negras procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico.   |   |   | Decreto 100/2018, de 20 de diciembre, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria   | Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre la valorización de escorias siderúrgicas.  |
| Residuo  | Escorias negras   |   |   | Escorias negras, blancas, ferrosilicomanganeso, de incineración de residuos domésticos y de fundición de metales féreos   | Escorias negras   |
| Escenarios/Categorías de aplicación            | Tipo 1  | Tipo 2  | Tipo 3  | Valorizable: Cumple límites lixiviación<br>No Valorizable: No cumple límites lixiviación  | Valorizable: Cumple límites lixiviación<br>No Valorizable: No cumple límites lixiviación  |
| Descripción de las aplicaciones                | Aplicaciones ligadas (hormigón estructural, hormigón no estructural, hormigón para carreteras, material tratado con cemento, mezclas bituminosas en caliente, mezclas bituminosas en frío, tratamientos superficiales con gravilla, morteros)   | Aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable (zonas de talud en terraplenes, rellenos localizados, subbalasto de vías férreas y apantallamientos sónicos)   | Aplicaciones no ligadas bajo cobertura totalmente impermeable (zahorras artificiales, bases, subbases de vías peatonales, ciclistas y pistas deportivas, explanadas mejoradas, terraplenes excepto zonas de talud, espaldones, rellenos localizados, proy urbanización)   | Ferrosilicomanganeso (Construcción de carreteras y vías públicas o privadas de tráfico, obras de urbanización de áreas industriales y comerciales, fabricación de clínker, fabricación de hormigón, relleno interior de cajones de hormigón cerrados en construcción de diques, restauración de áreas degradadas por actividades extractivas)<br>Escoria negra ( construcción de carreteras y vías públicas o privadas de tráfico, obras de urbanización de áreas industriales y comerciales, fabricación de clínker, fabricación de hormigón, fabricación de aglomerado asfáltico, fabricación de ferroaleaciones, relleno interior de cajones de hormigón cerrados en construcción de diques)<br>Escoria blanca (fabricación de clínker)  | Base subbase y explanada mejorada de carreteras, vías públicas o privadas, urbanización de áreas industriales y estabilización física de suelos, nivelación de terrenos y terraplenes, en mezclas bituminosas, subbalasto de vías férreas, relleno interior de cajones de hormigón cerrados en diques.<br><br>En la fabricación del cemento u hormigón, queda sometida al régimen especial de los subproductos  |
| Valores límite                                 | No precisarán de medidas de control ambiental toda vez que queda acreditada la ausencia de afección al medio.   | Contenido total y lixiviación   | Contenido total y lixiviación   | Lixiviación (podrán no ser de aplicación cuando los usos previstos sean la fabricación de hormigón o cemento)   | Lixiviación   |
| Condiciones de aplicación                      |   | Si cumplen las condiciones de lixiviación pero no de contenido total, no podrán estar en contacto directo con el suelo. En este caso, únicamente podrán utilizarse cuando se disponga de una capa de material constructivo que impida su contacto directo con el suelo natural.<br><br>Cobertura de material granular compactado (densidad superior a 97% PM ) con granulometría continua en espesor no inferior a 25 centímetros. Superficie con inclinación igual o superior a 3H:1V vegetada. Cualquier otro elemento con análogas propiedades.  | Si cumplen las condiciones de lixiviación pero no de contenido total, no podrán estar en contacto directo con el suelo. En este caso, únicamente podrán utilizarse cuando se disponga de una capa de material constructivo que impida su contacto directo con el suelo natural.<br><br>Solera o pavimento de hormigón de espesor mínimo de 20 centímetros.<br>Gravacemiento de espesor mínimo de 20 centímetros.<br>Capas asfálticas tipo hormigón bituminoso de espesor igual o superior a 5 centímetros.<br>Lámina de impermeabilización (por ejemplo, de PE de alta densidad) protegida por geotextiles.<br>Cualquier otro elemento con análogas propiedades | En carreteras y vías públicas o privadas de tráfico rodado, aquéllas deberán contar con capa de rodadura impermeable y el espesor de la capa de escorias no superará: ferrosilicomanganeso 40 m y escoria negra de aceria 0.7 m<br><br>En carreteras de la Red autonómica de Cantabria además:<br>1.- Limitaciones al uso de escorias en determinadas zonas de la carretera (zonas confinadas salvo expansividad <0,3%, trasdoses de puentes, capas que drenen adecuadamente, estudiar posible corrosión de elementos cercanos)<br>2.- En terraplén (debe cumplir Artículo 330 PG3, hinchamiento libre <3% de acuerdo con la UNE 103601)<br>3.- En zahorras (debe cumplir Artículo 510 PG3, desintegración silicato bicalcico y hierro según UNE-EN 1744-1, contenido óxido magensio <5% según UNE-EN 196-2, envejecimiento <1% según NLT-361, cal libre <0,5% y azufre <0,5 en contacto con capas con cemento y < 1 % en el resto según UNE-EN 1744-1. Debe cumplirse igualmente prescripciones de angulosidad, partículas redondeadas, índice de lajas, fragmentación, limpieza, equivalente arena y granulometría)<br>4.-En mezcla bituminosa (debe cumplir Artículos 542 y 543 PG3, expansividad <3,5% según UNE EN 1744-1, envejecimiento <1% según NLT-361, cal libre <0,5% según UNE-EN 1744-1, sulfatos solubles en agua <0,2% en contacto con capas con cemento y < 0,7 % en el resto según UNE-EN 1744-1.<br><br>En obras de urbanización de áreas industriales y comerciales , además, capa superior impermeable.<br><br>En fabricación de hormigón estructural debe cumplir Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). | En base, subbase y explanada mejorada de carreteras, la capa de escoria debe ser <70cm y disponer de capa de rodamiento asfáltico, de hormigón, o una capa impermeable en la superficie.<br><br>En nivelación de terrenos y terraplenes, grueso máximo de escorias de 1 m por término medio cada 1.000 m² de extensión, sin sobrepasar los 2 m de altura, y siempre que la superficie sea recubierta después con capa impermeable de una permeabilidad inferior a 10-9 m/s.<br><br>Como subbalasto de vías férreas sobre suelos arcillosos o poco permeables, con una capa de escoria siderúrgica valorizable que no supere los 50 cm de grueso, siempre que ésta esté coninada, disponga de un cubrimiento superficial impermeable, y que esté recubierta por una capa superior de balasto |
| Limitaciones y prohibiciones de uso            |   | No se utilizarán en lugares con alguna figura de protección especial contemplada en la normativa sobre la conservación de la naturaleza.<br>No se utilizarán en contacto directo con el suelo en aquellas zonas cuyo uso sea asimilable al de "Otros usos".<br>No se utilizarán en aquellos usos que impliquen contacto con el agua.<br>No se utilizarán como material granular en aplicaciones drenantes o en lugares por donde discurra agua de manera temporal.<br>No se utilizarán en usos en los que se emplacen en aplicaciones sin cobertura alguna, tales como pistas forestales, caminos rurales no asfaltados u hormigonados o balastos ferroviarios. |   | No se utilizarán en zonas inundables o en aquellas zonas comprendidas dentro de los perímetros de protección de acuíferos con vulnerabilidad muy alta o alta.<br>No se utilizarán en espacios naturales que presenten alguna figura de protección especial de las recogidas en la legislación sobre espacios naturales y conservación de la naturaleza.   | No se utilizarán en zonas inundables por un periodo de retorno de 100 años.<br>En terrenos que tengan el nivel freático a menos de 2,5 metros de la superficie en la que se tengan que aplicar las escorias.<br>En terrenos situados a menos de 100 metros de distancia de pozos de abaste-cimiento de agua potable a poblaciones   |
| Almacenamiento y zonas de tratamiento          | En condiciones que aseguren la ausencia de afección al medio ambiente.<br>Adecuado pavimento y diseño de pendientes suficientes en las zonas donde se desarrollen las operaciones.<br>Capa impermeable resistente al tránsito de vehículos y maquinaria.<br>Elementos que impidan la mezcla de materiales tratados y no tratados, y la mezcla entre sí de las distintas fracciones de materiales tratados.<br>Disponer de medidas anti-polvo. |   |   | En condiciones que aseguren la ausencia de afección al medio ambiente.<br>Adecuado pavimento y diseño de pendientes suficientes en las zonas donde se desarrollen las operaciones.<br>Medidas al objeto de atenuar el ruido y las emisiones de polvo.   | Adecuado pavimento y diseño de pendientes suficientes en las zonas donde se desarrollen las operaciones.<br>Medidas al objeto de atenuar las emisiones de polvo.  |
| Control de calidad y frecuencia de los ensayos | Control de la expansividad (UNE EN 1744) en función de los requerimientos de cada uso.<br><br>Granulometría en función de los requerimientos de cada uso  | Análisis periódicos con una determinada frecuencia<br><30.000 tm/año 1 muestra/3 meses<br>>30.000 tm/mes<br>Control de la expansividad (UNE EN 1744) acreditativo de que no se ha producido la mezcla de escorias negras con escorias blancas.<br>Granulometría en función de los requerimientos de cada uso<br>Requisitos de trazabilidad<br>Registro actualizado  |   | Análisis periódicos con frecuencia:<br>1er año: 1 muestra/6 meses<br>Registros de trazabilidad<br>Memoria anual para la DGMA  | Análisis cada 25.000 toneladas tratadas o pequeños tratadores/as con una periodicidad mínima de tres meses<br>Registros de trazabilidad   |
| Normas de producto                             | Marcado CE en aquellos usos para los que resulte exigible por la legislación europea de aplicación.   |   |   | Para capas granulares y/o mezclas bituminosas en la construcción de carreteras, deberá contarse con el marcado CE del producto, que debe ir acompañado de la Declaración de Prestaciones y de las instrucciones e información de seguridad del producto.<br><br>Deberán cumplir con lo que establece el Reglamento (REACH)  |   |

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

**ANEXO VIII. RESUMEN DE LOS REQUISITOS REGULADOS EN LA NORMATIVA/GUÍAS QUE ABORDAN EL USO DE ESCORIAS TRATADAS DE FUNDICIÓN DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO COMO MATERIAL DE LA CONSTRUCCIÓN EN LOS DISTINTOS EEMM**

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*

| Pais   | Francia   |   |  | Países Bajos   |  |  | Flandes   | Alemania  |   |                  |      | Italia  | Suiza  | Reino Unido   |   |
|--|---|---|--|--|--|--|---|---|---|------------------|------|---|--|---|---|
| Norma/Régimen jurídico                         | Guías de uso "Acceptability of Alternative Materials in Road Construction. Environmental Assessment" Sétra 2011 Guide d'application. Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière. Les laitiers sidérurgiques", Sétra 2012   |   |  | Decreto de Calidad del Suelo Holandés (Soil Quality Decree (SQD)) 2008. Normativa que regula materiales de construcción  |  |  | Reglamento VLAREMA sobre la gestión sostenible de los ciclos de materiales y residuos, de 17 de febrero de 2012. Normativa que regula materiales de construcción re   | Decreto sobre Materiales Substitutivos de Construcción, por el que se modifica el Decreto Federal de Protección del Suelo y Suelos Contaminados y el Decreto de Vertederos y la Ordenanza de Residuos Comerciales, 2017 Normativa que regula materiales de construcción   |   |                  |      | Regione Lombardia, Osservatorio per l'Economia Circolare e la Transizione Energética. Tavolo scorie di fusione. Scoria nera da forno elettrico EAF-C. 2020. | Valorisation des laitiers d'acier électrique (LAFE) de 2018  | Aggregate from waste steel slag: quality protocol 2016  |   |
| Residuo  | Escorias negras   |   |  | Escorias de acería negras y blancas<br>Escorias de cobre   |  |  | Todo tipo de escorias de fundición (entre las que podrían incluirse escorias negras, blancas, silicomanganeso y cobre)  | Escorias negras   |   | Escoria de cobre |      | Escoria negra   | Escoria negra  | Escoria negra   |   |
| Escenarios/Categorías de aplicación            | Tipo 1  | Tipo 2  | Tipo 3   | Conformado   | No conformado  | No conformado IBC  | -   | SWS1  | SWS2  | CUM1             | CUM2 | -   | -  | -   |   |
| Descripción de las aplicaciones                | Construcción de carreteras (árido no ligado, árido tratado con ligante hidráulico, mezclas bituminosas, tratamiento superficial de firmes)  |   |  | Material de construcción consistente en fragmentos grandes (volumen superior a 50 cm3) con prácticamente ningún riesgo de erosión o desgaste en condiciones normales   | Material de construcción consistente en fragmentos pequeños (volumen inferior a 50 cm3) o no estable en condiciones normales (cenizas, materiales granulares). | Materiales granulares que únicamente pueden ser empleados con medidas de aislamiento, gestión y control porque su aplicación sin estas medidas podría generar un daño en el medio ambiente | Materiales destinados para su uso como material de la construcción  | Para cada una de las tres Clases de Material identificadas, se incluyen tablas detalladas en las que para cada método de construcción se establece si el material puede aplicarse (+) o no (-) o si puede emplearse en condiciones restringidas (como distancias a puntos de agua, con canales de drenaje, etc.), en función de si se encuentran fuera o dentro de las zonas de protección de aguas subterráneas definidas en la normativa. De forma genérica, para la clase de Material 1, se permite el uso de la escoria para la mayor parte de las aplicaciones tanto ligadas como no ligadas, incluso en suelos permeables como arena. Para los métodos de construcción sin capa de impermeabilización, también se permite su uso, pero con condiciones más estrictas (valores límite inferiores a los establecidos en el Anexo 1 o su aplicación en suelos de menor permeabilidad). La clase de material 2 es similar a la 1, pero con condiciones de aplicación más restrictivas y, en el caso de la clase 3, debido al nivel de concentración relativamente alto en su eluato, únicamente se permite el uso de estos materiales fuera de las áreas de protección de aguas subterráneas y con limitaciones en las aplicaciones no ligadas. |   |                  |      | Construcción de carreteras y obras de ingeniería civil, la fabricación de suelo-cemento, como árido para hormigón o árido para mezclas bituminosas.         | Material de construcción   | Aplicaciones no ligadas: Árido para sub-bases, cobertura, relleno, cama de tubería. Aplicaciones semi-ligadas: Árido para el tratamiento de superficies. Aplicaciones ligadas: Árido para la fabricación de asfalto y hormigón, árido en mezclas con conglomerante hidráulico.  |   |
| Valores límite                                 | Lixiviación (nivel 1), si se supera algún límite ensayo de percolación (nivel 2), si se supera algún límite posibilidad de elaborar estudio específico (nivel 3)  |   |  | Contenido, lixiviación e inmisión si la aplicación difiere de la estándar ( altura de aplicación de 0,7 metros, densidad de 1.550 kg/m³ e infiltración efectiva en la estructura de 300 mm/año)  |  |  | Contenido y lixiviación   | Lixiviación   |   |                  |      | Lixiviación y si supera límites ecotoxicidad  | Contenido y lixiviación  | Evaluaciones de riesgo realizadas concluyeron que no existe riesgo para las aguas subterráneas y superficiales ni para la salud humana por lo   |   |
| Condiciones de aplicación                      | 0-3 m de espesor bajo estructura revestida ( bajo capa superficial impermeable, pendiente mínima del 1%)  | 6 m bajo estructura cubierta (bajo 30 cm de mat natural o equivalente, pendiente mínima 5%) o 3-6 m bajo estructura revestida | sin restricciones de espesor, bajo arcnos y aceras, rellenos localizados, caminos forestales, agrícolas y de sirga | Según las guías:<br>Guía de Evaluación Nacional BRL 9345 para el certificado de producto NL BSD* para Escorias y Mezclas de Escorias como material en obras de ingeniería civil<br>Guía de Evaluación Nacional BRL 9310 para el certificado de producto KOMO* para Escorias y Mezclas de Escorias como material en obras de ingeniería civil   |  |  | No se especifica ninguna condición respecto al uso o aplicación   | Deben cumplir requisitos de materiales de construcción y suelos utilizados en la construcción de capas sin aglutinantes en la construcción de carreteras (TL SoB-StB 04)  |   |                  |      | -   | Como árido no ligado, y con objeto de proteger las aguas superficiales y subterráneas, la escoria tratada debe utilizarse bajo capa impermeable (betón u hormigón) | Control de la expansividad (EN 1744-1)  |   |
| Limitaciones y prohibiciones de uso            | Prohibido su uso en los parques nacionales<br>A menos que expertos aconsejen lo contrario, su uso está prohibido en :<br>•Zonas inundables y a menos de 50 cm del nivel de agua más alto de los últimos 50 años o, en su defecto, del nivel de agua más alto conocido<br>•A menos de 30 m de cualquier curso de agua, incluidos lagos y estanques. 60 m si el lecho del curso de agua es inferior en más de 20 m a la base de la estructura y en las zonas designadas como zonas de protección<br>•En perímetros de protección tomas de agua potable<br>•En áreas cubiertas por una servidumbre de utilidad pública para protección de recursos hídricos<br>•En afloramientos cársticos |   |  | Prohibido su uso en los parques nacionales<br>pH > 12 A menos que expertos aconsejen lo contrario, su uso está prohibido en :<br>•A menos de 30 m de cualquier curso de agua, incluidos lag os y estanques. 60 m si el lecho del curso de agua es inferior en más de 20 m a la base de la estructura y en las zonas designadas como zonas de protección<br>•En perímetros de protección tomas de agua potable<br>•En áreas cubiertas por una servidumbre de utilidad pública para protección de recursos hídricos  |  |  | BRL 9345 Escoria negra no se permite en obras costeras o de ribera, ni en contacto con agua, salvo aquellas con un tamaño granulométrico d/D, siendo el tamaño mínimo d≥ 31,5mm y máximo D≥ 63 mm.<br>BRL 9310 Escoria negra y cobre en capas de firme, en hormigón no estructural o en mezclas bituminosas según tamaños granulométricos | No se especifican   | En las zonas de protección de aguas y de manantiales minerales de la zona I, se prohíbe la incorporación de materiales de construcción o mezclas sustitutivos de minerales. |                  |      |   | -  | No podrá utilizarse en zonas de protección de aguas subterráneas ni en contacto directo o a menos de 2 metros de éstas, distancia que puede ser menor si con permiso de la autoridad competente se demuestra ausencia de riesgo. Tampoco en capas de drenaje o trabajos de infiltración de aguas superficiales, así como en la construcción de diques o pistas de graveras, marismas o canchales. Si la escoria tratada se utiliza en capas intermedias debe separarse de otros materiales de construcción, | - |
| Almacenamiento y zonas de tratamiento          | Capacidad de almacenamiento temporal limitada a 1.000 m3<br>Más de 1.000 m3, necesidad de opinión de un experto hidrogeólogo  | Sin limitaciones  |  |  |  |  |   |   |   |                  |      |   |  |   |   |
| Control de calidad y frecuencia de los ensayos | Instalación <30.000 t/año , 1 muestra por trimestre, aumentando los periodos si no superan los valores límite<br>Instalación >30.000 t/año , 1 muestra por mes, aumentando los periodos si no superan los valores límite<br>Procedimiento de control de calidad que incluya todos los documentos necesarios para controlar el material alternativo a lo largo de su proceso de producción, demostrar el cumplimiento de los requisitos exigidos en la guía y conocer su destino final , así como todos los actores implicados para garantizar una correcta trazabilidad. Conservación de documentación durante al menos 3 años  |   |  | Certificado de calidad ambiental. Si el lote cumple valores de emisión máximos se expedirá este certificado donde figure nombre y dirección de quien lo expide, el material de construcción, el uso y las condiciones de aplicación.<br>Declaración ambiental. Se permiten tres tipos de declaración para demostrar la calidad de un material de la construcción:<br>- a través de una inspección, siendo el muestreo realizado por una entidad reconocida;<br>- mediante un certificado del producto emitido por un organismo de certificación reconocido y la aprobación por parte de la administración;<br>- o bien mediante una declaración propia del fabricante, sin controles externos por parte de un organismo de certificación reconocido ni el reconocimiento de la declaración por la administración (sólo recomendado para materiales que no generan riesgo). |  |  |   | El control de calidad es similar para todos los materiales de sustitución, independientemente de que se hayan definido como subproductos, como fin de la condición de residuo o como materiales residuales.<br>Ensayos control en fábrica cada 8 semanas de producción al menos cada 10.000 toneladas, no más de 18 ensayos al año o cada 13 semanas de producción al menos cada 20.000 toneladas, no más de 6 ensayos al año.<br>Ensayos por entidad independiente cada 26 semanas de producción al menos cada 30.000 toneladas, no más de 6 ensayos por año o cada 26 semanas de producción al menos cada 60.000 toneladas, no más de 3 ensayos por año.<br>Requisitos de trazabilidad y registro   |   |                  |      | Sistema de Control de Producción en Fábrica   | Muestra mensual. Cada 6 meses, una de las muestras deberá analizarse con objeto de conocer los parámetros ambientales requeridos.                                  | Sistema de Control de Producción en Fábrica<br>Requisitos de trazabilidad y registro  |   |
| Normas de producto                             | normas francesas NF P 18-545[6] y NF P 11-300[7], así como las normas armonizadas NF EN 13242 (áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos) y NF EN 13043 (áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales).   |   |  | Distintivos de calidad: marcado CE, el certificado NL-BSB o la certificación KOMO  |  |  | Certificados de entidades de certificación ambiental COPRO y CERTIPRO que son obligatorios para los áridos reciclados, y voluntarios para los agregados áridos secundarios  |   |   |                  |      | Marcado CE  |  | Marcado CE y Reglamento Europeo de los Productos de la Construcción   |   |

*[Página dejada intencionadamente en blanco]*