

1. INTRODUCCIÓN

El siglo *xx* estuvo marcado por un desarrollo industrial, económico y demográfico sin precedentes. Resulta indudable que los logros alcanzados en el siglo pasado nos han proporcionado unas mejoras formidables en nuestra calidad de vida a nivel socioeconómico. Sin embargo, también es cierto que dicho desarrollo se ha logrado, en gran medida, a costa del agotamiento de los recursos naturales del planeta, del empobrecimiento de la calidad medioambiental o de la pérdida de la biodiversidad, entre otros. En la actualidad, la sociedad está adquiriendo cada vez más consciencia sobre esta problemática y demandando modelos de crecimiento acordes con el respeto a los límites medioambientales del planeta y con el aprovechamiento eficiente de los recursos. Esto se está traduciendo en el impulso de estrategias a nivel global que apuestan cada vez más por la sostenibilidad, encabezadas por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (promovidos por las Naciones Unidas), los cuales sirven de guía para encauzar las políticas mundiales hacia un progreso socioeconómico asentado en la sostenibilidad [1].

Una de las herramientas más eficientes para la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible es la implantación del modelo de Economía Circular. Este modelo pretende constituir una alternativa al esquema tradicional de producción lineal, basado en el consumo ilimitado de materias primas naturales y el vertido incontrolado de los residuos generados en los procesos productivos. Para ello, propone una explotación eficiente de los recursos fundamentada en la priorización de medidas como la reutilización, el reciclaje y la recuperación [2, 3]. Una de las principales consecuencias del fomento de la Economía Circular es la promoción de simbiosis industriales, es decir, la búsqueda de estrategias empresariales en las que se explore la cooperación entre sectores industriales para alcanzar un beneficio mutuo a partir del aprovechamiento de recursos infrautilizados, como puede ser la reutilización de residuos o subproductos de una industria como materia prima para otro sector [4].

En este contexto, el sector de la construcción se encuentra en el punto de mira. En primer lugar, debido a que esta industria lleva asociada el consu-

mo de grandes cantidades de recursos naturales y la generación de una importante huella medioambiental. En concreto, más del 40 % de las materias primas consumidas en la Unión Europea se destinan a este sector, el cual también es responsable del 36 % de los residuos generados por los Estados Miembros [5, 6]. De esta forma, la construcción constituye una de las industrias más afectadas y presionadas por el impulso de las medidas de desarrollo sostenible y la protección medioambiental. En segundo lugar, debido precisamente a los volúmenes de materiales y residuos involucrados, así como a la versatilidad del sector constructivo, la construcción resulta una de las actividades económicas con mayor potencial de aplicación de los principios de la Economía Circular, de la que pueden surgir múltiples oportunidades para la innovación y la simbiosis industrial.

Dentro del sector de la construcción, el material por excelencia, y posiblemente el más proclive al establecimiento de sinergias beneficiosas con otros sectores, es el cemento Portland.

1.1. La industria del cemento

El proceso de fabricación convencional del cemento Portland, expuesto en la Figura 1.1, consiste esencialmente en la extracción, trituración y molienda de las materias primas naturales (principalmente calizas y arcillas) y su posterior calcinación en torno a 1450 °C para dar lugar al clínker, el cual constituye el componente fundamental del cemento. A este se le añade yeso y otros componentes minoritarios, finalizando el proceso con la molienda de dicha mezcla [7-9]. Las características del proceso de fabricación del cemento plantean una gran problemática desde el punto de vista medioambiental, ya que, como se puede comprobar en la Figura 1.1, la elaboración de este material implica una ingente exigencia energética (≈ 3500 MJ/t clínker), un gran consumo de materias primas naturales (1,5-1,7 t/t clínker) y una elevada cantidad de gases de efecto invernadero, fundamentalmente en forma de CO₂. Este se considera uno de los efectos ne-

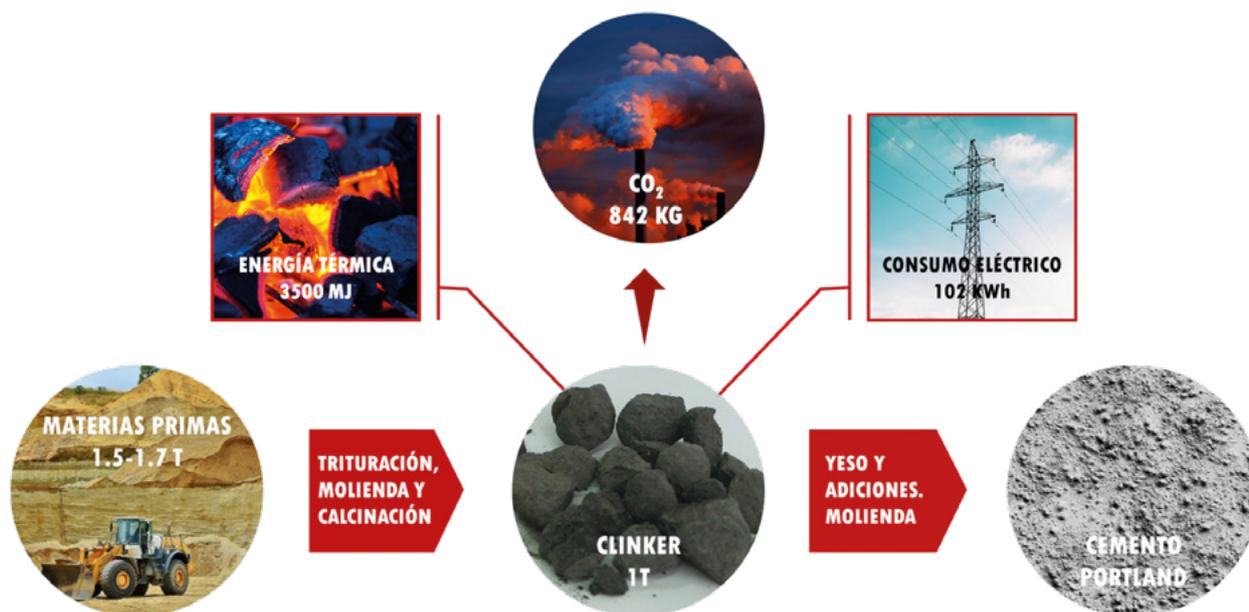


Figura 1.1. Esquema de fabricación del cemento Portland. Fuentes: [10-13].

gativos de mayor relevancia asociados al sector cementero.

La elevada huella de carbono relacionada con el sector cementero tiene su origen en:

- El alto nivel de emisiones de CO₂ derivado de la descarbonatación de las calizas a las altas temperaturas aplicadas durante el proceso, así como el elevado gasto en combustibles requerido para alcanzar dichas temperaturas, lo que sitúa el valor medio de emisiones de CO₂ en 842 kg por tonelada de clinker producido, de acuerdo con el WB-CSD [13].
- La inmensa demanda de cemento existente a nivel mundial, situada en torno a 4100 millones de toneladas anuales, la cual se prevé que continúe incrementándose hasta un 12-13% en 2050 [14,15].

La suma de ambos factores sitúa a la industria del cemento en una de las más contaminantes del planeta, a la cual se le atribuye aproximadamente un 7% de las emisiones antropogénicas totales de CO₂ [16]. De esta forma, el sector se encuentra en el foco de atención de las políticas de lucha contra el cambio climático, las cuales actualmente ejercen una gran presión sobre la industria cementera para que disminuya su huella medioambiental.

Una de las formas más eficientes de hacer frente a los retos medioambientales a los que se enfrenta la industria cementera es la puesta en prác-

tica de los fundamentos de la Economía Circular. En realidad, ya sea por motivos económicos, técnicos o medioambientales, el sector del cemento lleva décadas beneficiándose de la implantación de sinergias industriales con diferentes compañías generadoras de residuos. El éxito de estas relaciones empresariales reside en que las características del proceso de fabricación del cemento resultan altamente ventajosas para sacar el máximo provecho de diversos tipos de desechos. En primer lugar, las grandes cantidades de material que maneja la industria cementera suponen una de sus facetas más atractivas, puesto que se traducen en una capacidad de aprovechamiento de residuos que pocas actividades económicas serían capaces de absorber, en lo que a volumen se refiere. La segunda ventaja se encuentra en su versatilidad, puesto que las posibilidades de incorporación de residuos a lo largo del proceso de fabricación de cemento son múltiples y variadas. En este aspecto cabe destacar que el sector cementero es muy flexible en lo que concierne a la naturaleza de los residuos a incorporar, generando oportunidades de mercado incluso para materiales que resultan peligrosos o para los cuales su aprovechamiento no resulta rentable en otros ámbitos.

En ese sentido, por ejemplo, las fábricas de cemento están a día de hoy completamente familiarizadas con el uso de residuos como combustibles alternativos a los combustibles fósiles tradicionales. La gama de residuos aprovechables de esta forma es muy extensa, incluyendo biomásas vegetales o ani-

males, residuos de origen fósil (aceites y disolventes utilizados, pinturas, plásticos, etc.), neumáticos y restos de vehículos fuera de uso, residuos municipales o lodos industriales, entre otros. También, resulta habitual reducir la explotación de materias primas naturales (arcillas y calizas) sustituyéndolas parcialmente por residuos ricos en calcio, silicio, aluminio y/o hierro. Entre estos destacan los residuos de construcción y demolición (RCDs), los suelos contaminados, las conchas de moluscos o las cenizas volantes procedentes de las centrales térmicas [17, 18].

Sin embargo, la vía de reutilización de residuos más eficaz e interesante desde el punto de vista medioambiental comprende su aprovechamiento como adiciones minerales. Esto ocurre en el caso de residuos ricos en sílice o alúmina reactiva que, o bien poseen capacidades cementantes por sí mismas, o las desarrollan al reaccionar con la cal liberada en la hidratación del cemento, en cuyo caso reciben el nombre de *puzolanas*, las cuales repercuten directamente en la reducción de la relación clínker/cemento. Esta reducción en la proporción de clínker permite disminuir la cantidad de materias primas naturales y de combustible necesarios en la fabricación de cemento, y en consecuencia, constituye una sencilla forma de reducir el volumen de emisiones asociado al proceso. Otra ventaja adicional del uso de adiciones minerales es que su empleo se traduce con frecuencia en una mejora de las propiedades de los cementos resultantes desde el punto de vista técnico, especialmente en lo que respecta a sus propiedades durables. Esto supone una ventaja primordial

desde el punto de vista de la Economía Circular, ya que el fomento de la durabilidad de los materiales implica un incremento en su vida útil, y retrasa la demolición de las estructuras de las que forma parte [19]. De esta forma, se logra una reducción en la generación de residuos y se evita la necesidad de construcción de nuevas estructuras que las sustituyan, con el consiguiente ahorro en materias primas.

El empleo de residuos como adiciones minerales al cemento se remonta al siglo XIX, cuando comenzaron a emplearse las escorias de alto horno procedentes de la producción de hierro con este fin [20]. La normativa actual para la fabricación de cementos comunes incluye, junto con las escorias de alto horno, otros dos tipos de residuos industriales como adiciones puzolánicas: las cenizas volantes, que se generan como subproducto en las centrales termoeléctricas, y el humo de sílice, producido durante la fabricación de silicio o ferrosilicio [21]. Otras opciones dentro de la normativa vigente, al margen de los productos derivados de residuos industriales, son las calizas, los esquistos calcinados o las puzolanas naturales o puzolanas naturales calcinadas.

Tal y como se observa en la Figura 1.2, el grado de sustitución medio de clínker por adiciones minerales se sitúa en el 30%. Dentro de estas, como se puede comprobar en la figura, las adiciones más empleadas son claramente aquellas derivadas de residuos industriales, especialmente las escorias de alto horno y las cenizas volantes, y demuestran así el éxito de las medidas de la Economía Circular en el sector cementero.

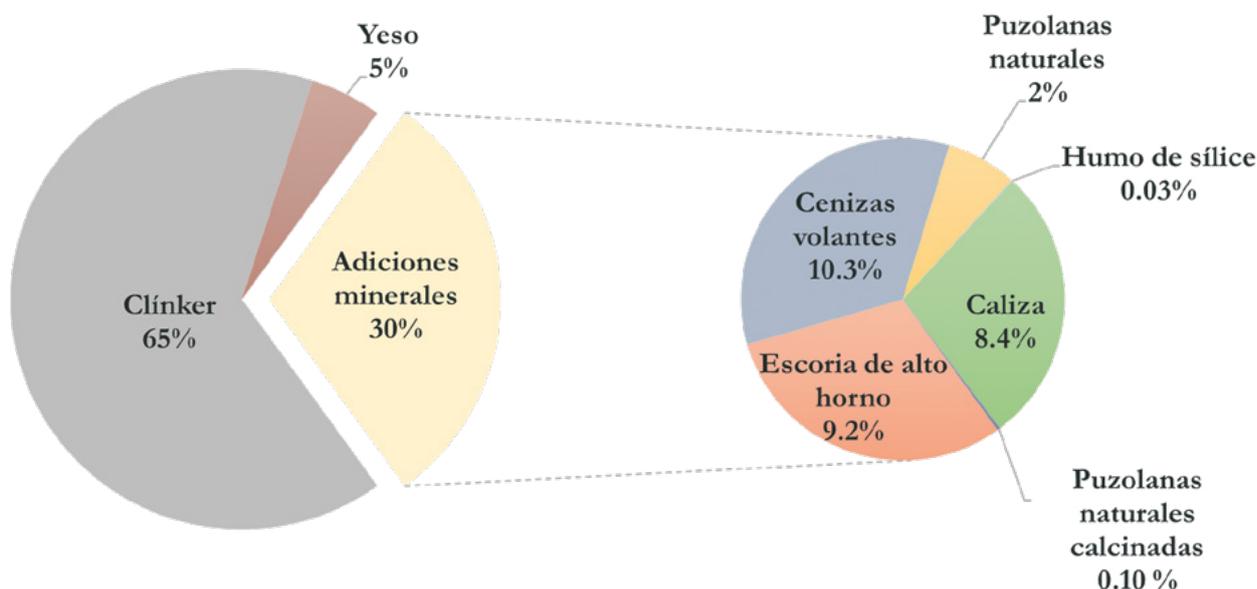


Figura 1.2. Composición promedio de los cementos a nivel global. Fuente: [22, 23].

Sin embargo, los niveles de sustitución de clínker empleados en la actualidad resultan insuficientes para hacer frente a los desafíos medioambientales que se le exigen a la industria cementera. Esto supone un gran problema, ya que la disponibilidad actual de las adiciones minerales en las que se sustenta el sector —escorias de alto horno y cenizas volantes— se encuentra en declive. Esta situación deriva también de la implantación de nuevas políticas de desarrollo sostenible, las cuales están provocado cambios importantes en los métodos de producción en los hornos de producción de hierro y la sustitución del carbón por combustibles alternativos en las centrales térmicas, que están reduciendo progresivamente sus producciones [22-24]. Como consecuencia, actualmente no se dispone de un volumen suficiente de adiciones para afrontar el mayor descenso en la proporción de clínker que demandan las nuevas políticas medioambientales.

Una de las opciones que se plantea en la actualidad para resolver la reducción de las puzolanas tradicionalmente utilizadas en la fabricación de cementos comerciales es promover otras puzolanas, entre las que se encuentran las arcillas calcinadas (Q), recogidas en la normativa vigente a nivel mundial durante décadas y para las cuales existe una amplia disponibilidad de yacimientos a lo largo del planeta. Dentro de las arcillas calcinadas, la opción que despierta un mayor interés para la producción de cemento son las arcillas de naturaleza caolinítica. Su éxito reside en que estas requieren temperaturas de calcinación relativamente bajas, con respecto a otras arcillas (en el rango de 550-900 °C) y a las buenas propiedades puzolánicas que presenta tras su activación [25-29]. Durante este proceso de calcinación se produce la pérdida de grupos hidroxilo de la caolinita, lo que causa un desorden en la estructura cristalina y da lugar a un compuesto amorfo denominado *metacaolín*. El uso del metacaolín como puzolana se encuentra bien documentado, y se ha comprobado que su empleo para la fabricación de cementos binarios resulta beneficioso tanto desde el punto de vista de sus propiedades físico-mecánicas como durables [30-36]. A pesar de ello, el empleo del metacaolín como adición, y el de las arcillas calcinadas en general, es prácticamente inexistente en los cementos comerciales, tal y como reflejan los datos incluidos en la Figura 1.2.

Existen dos razones fundamentales que explican la falta de atractivo del metacaolín en la industria cementera. La primera de ellas es de naturaleza económica. En primer lugar, aunque el planeta cuenta con amplias reservas de arcillas, los depósi-

tos de caolinita de alta pureza no son tan abundantes, y son muy demandados por otras actividades económicas como la industria papelera o la cerámica, lo cual incrementa su coste [37, 38]. Además, a diferencia de otros materiales utilizados como adiciones, las arcillas requieren un tratamiento térmico para su transformación en puzolanas, lo cual conlleva un coste adicional.

La segunda razón detrás de la falta de popularidad del metacaolín es de tipo medioambiental. Primero, debido a la huella de carbono adicional que requiere su activación. No obstante, en este aspecto, hay que considerar que las temperaturas de activación de las arcillas son mucho menores que las necesarias para la fabricación del clínker, y que, como subproducto de la calcinación, se libera vapor de agua en lugar de CO₂. Por tanto, aunque la huella de carbono de las arcillas calcinadas es mayor que la de otras adiciones como las cenizas volantes o las escorias de alto horno, su uso sí resulta rentable medioambientalmente con respecto a la fabricación del clínker [39]. De esta forma, pueden resultar una opción interesante ante la escasez de otros tipos de puzolanas. Sin embargo, hay otro aspecto medioambiental que frena su aplicación en la industria cementera: el impacto medioambiental y paisajístico asociado a la explotación de depósitos naturales de caolinita. A consecuencia de este, las políticas de protección medioambiental de diversos países tienden a limitar la explotación de yacimientos naturales, de forma que la disponibilidad efectiva de las arcillas como materia prima para la obtención de puzolanas se ve significativamente reducida [40].

En definitiva, el uso generalizado de metacaolín no resulta competitivo tanto desde el punto de vista medioambiental como económico. No obstante, la aplicación de los fundamentos de la Economía Circular sería capaz de superar estos inconvenientes mediante el fomento del uso de residuos que contengan caolinita en su composición como materia prima para la obtención de puzolanas. De esta manera, estos residuos supondrían una fuente de bajo coste de materiales caoliníticos, sin necesidad de alterar las reservas naturales de arcillas. Con este propósito, en los últimos tiempos se han estudiado algunos residuos industriales de base caolinita con propiedades prometedoras, entre los que destacan los lodos papeleros y de depuradora [41-48]. A pesar de los buenos resultados obtenidos con estos residuos, estos lodos industriales no se generan en volúmenes lo suficientemente elevados como para constituir por sí mismos una solución a la escasez de adiciones minerales a los que se enfrenta actual-

mente el sector cementero. Sin embargo, existe una opción menos explorada pero que presenta un gran potencial dentro de este ámbito debido principalmente a su mayor disponibilidad: los residuos procedentes de las actividades de extracción del carbón.

1.2. Los residuos de la extracción de carbón

A pesar de los esfuerzos a nivel mundial para sustituir los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables, el carbón continúa manteniendo una posición distinguida en el mercado energético actual. Concretamente, el 29% de la energía producida a nivel global deriva de la combustión del carbón

[49]. Para satisfacer esa demanda energética, en 2018 se llegaron a extraer 7813 millones de toneladas de carbón en el planeta, y se espera que estas cifras aumenten en los próximos años [50]. En la Unión Europea existe una mayor preocupación por el medio ambiente, de forma que, como se puede comprobar en la Figura 1.3, la producción y el consumo de carbón ha ido reduciéndose paulatinamente en las últimas décadas [51]. No obstante, este descenso se está produciendo lentamente, puesto que la energía generada en los Estados Miembros aún depende en gran medida de la combustión de este mineral [52]. Actualmente, las cantidades de carbón extraídas anualmente en la Unión Europea ascienden aproximadamente a 630 millones de toneladas [51].

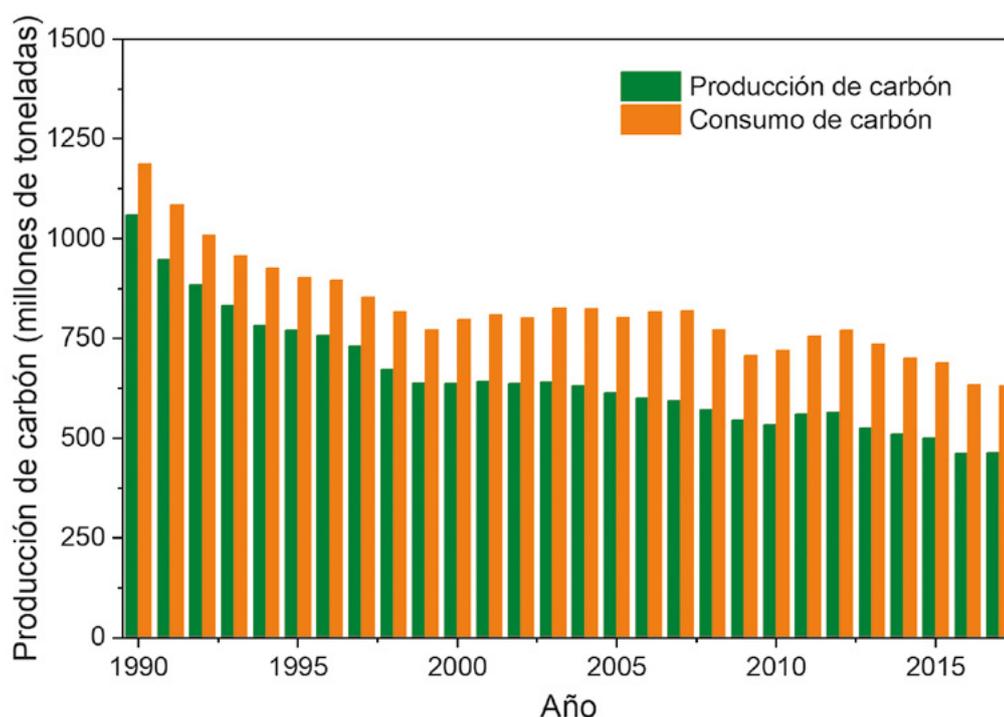


Figura 1.3. Evolución del consumo y la producción de carbón desde 1990 en la Unión Europea. Fuente: [51].

Las grandes cantidades de carbón extraídas anualmente conllevan un daño medioambiental que va más allá de las emisiones de CO₂ que se producen durante su combustión. La explotación de los yacimientos de carbón también da lugar a un gran impacto negativo en su entorno. En gran medida, la causa subyacente de dicho impacto se relaciona con la generación de los residuos generados durante la extracción del carbón, habitualmente denominados *estériles de carbón*.

Los estériles de carbón están compuestos por la fracción de naturaleza rocosa que se obtiene como residuo durante la extracción y el lavado de carbón. Tal y como se recoge en la Figura 1.4, los estériles de carbón comprenden dos tipos de flujos de residuos. El primero de ellos se genera durante la extracción del carbón en el yacimiento, e incluye fundamentalmente las rocas encajantes de las capas carboníferas, es decir, el material litológico situado sobre las vetas de carbón o entre ellas, que es necesario reti-

rar para proceder a la explotación de las mismas. Por otra parte, los estériles de lavado están constituidos por las impurezas —principalmente arcillosas— obtenidas durante el proceso de tratamiento y purificación del carbón bruto [53].

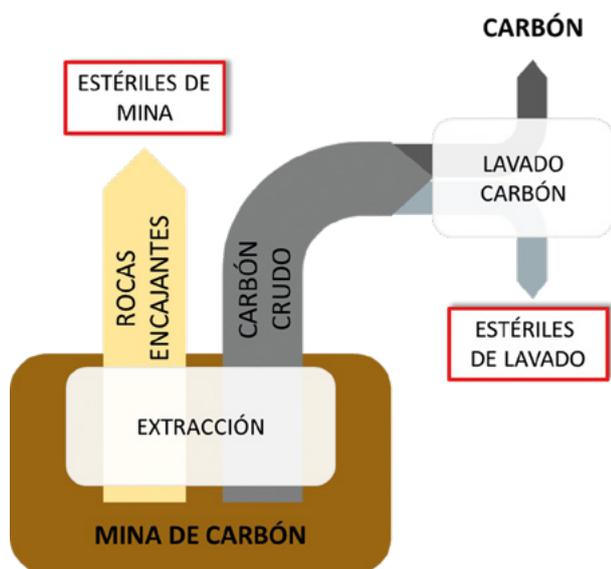


Figura 1.4. Esquema de generación de los estériles de carbón.

Aunque los estériles contienen restos de carbón, su composición está realmente dominada por óxidos de silicio y aluminio. Además de estos elementos, comúnmente contienen cantidades variables de calcio, hierro, sodio, potasio, magnesio, azufre o cloro, y es posible encontrar trazas de metales pesados en ellos como mercurio, plomo, cadmio o cromo, entre otros. Debido a su naturaleza silicoaluminosa, los minerales que componen los estériles de carbón suelen ser de tipo arcilloso, y es frecuente la presencia de caolinita, illita o esmectita, además de otros filosilicatos como las micas. Otros minerales habituales pueden ser el cuarzo, los carbonatos, los feldspatos o minerales derivados del hierro o el azufre (hematita o pirita) [54-56].

El mayor problema de los estériles de carbón se encuentra en las cantidades y el modo de gestión de estos. La estimación de los volúmenes de residuos generados en las minas de carbón resulta muy compleja, pues estos dependen enormemente de las características geológicas de la mina y del tipo de extracción. De esta forma, se pueden encontrar ejemplos en la bibliografía en los cuales se contemplan cantidades que abarcan desde el 10-30 % del carbón producido hasta un 50-60 % del material extraído [57-62]. En algunas minas a cielo abierto se

ha notificado la extracción de cantidades de estériles del orden de 6-7 veces superiores a las del carbón producido [55]. Por tanto, aunque exista una gran discrepancia en la proporción de estériles generados en las minas de carbón, resulta evidente que el conjunto de estos comprende la producción de, al menos, varios cientos de millones de toneladas anuales, que podrían llegar incluso a miles de millones.

Las minas de carbón no disponen, en general, de un modo eficiente de gestión de los altos volúmenes de residuos derivados de la explotación de las minas, por lo que resulta práctica habitual en estas su acumulación en las proximidades de la mina, creando colinas artificiales. La acumulación de los residuos de esta forma deriva en incontables efectos dañinos sobre el entorno, que comprometen el bienestar de sus habitantes, la biodiversidad de la zona o incluso el paisaje circundante [54, 58]. Por ejemplo, el material particulado de los acopios puede liberarse a la atmósfera, perjudicando a la calidad del aire de los alrededores. La lixiviación de sales, metales pesados o compuestos orgánicos tóxicos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), provocan la contaminación de las aguas y los suelos colindantes [55, 63, 64]. Ambos efectos se intensifican si los residuos contienen pirita en su composición, ya que la exposición de estos a la intemperie puede causar su oxidación. Dicha oxidación resultaría en la liberación de gases tóxicos o gases de efecto invernadero a la atmósfera (SO_2 , H_2S , CO_2 o CO) y en la acidificación de los flujos de agua que se encuentran en contacto con los residuos, lo que a su vez tiende a incrementar la solubilidad de los metales pesados y a favorecer su filtración hacia las aguas y terrenos circundantes [65-67]. La oxidación de la pirita también puede traducirse en fenómenos violentos de combustión espontánea de los residuos que podrían afectar a la seguridad de la población de la zona. En este sentido, la acumulación inadecuada de los residuos también puede resultar peligrosa, debido al riesgo de deslizamiento de estos [57, 58, 60].

El extenso conjunto de problemas medioambientales y sociales procedentes de la mala gestión de los estériles de carbón es motivo suficiente para justificar la necesidad de adoptar medidas alternativas urgentes para el tratamiento de estos residuos. Pero además, la acumulación de millones de toneladas de este material en vertederos conlleva una gran desventaja adicional: el desaprovechamiento de grandes cantidades de recursos. Ante estas circunstancias, los estériles de carbón se presentan como

unos excelentes candidatos para la aplicación de los principios de la Economía Circular.

Alguno de los métodos alternativos planteados para la gestión de los estériles incluyen su uso como material de relleno o su reutilización como combustible de bajo poder calorífico [57, 68]. Sin embargo, estas propuestas no suponen una solución real a muchos de los problemas medioambientales citados previamente. Dada la naturaleza silicoalumínica de estos residuos y sus grandes volúmenes, las opciones de gestión que parecen presentar un mayor potencial implican su puesta en valor a través de la creación de sinergias industriales con actividades pertenecientes al sector de la construcción. En este sentido, existen estudios que proponen el empleo de los estériles de carbón como materia prima secundaria en la construcción de carreteras [69-72], en la fabricación de ladrillos [73-75] y en la obtención de cementos y hormigones. La industria del cemento y hormigón, caracterizada por su gran versatilidad, es la que presenta una mayor cantidad de opciones para la revalorización de los estériles. Así, estos pueden reaprovecharse como áridos reciclados en el hormigón [67], como materia prima alternativa para la producción del clínker [76, 77] o

como base para la fabricación de cementos alternativos como los cementos alcalinos o los cementos de sulfoaluminato cálcico [78-80]. Pero en vista de la situación actual del cemento y su relación con el medioambiente, desarrollada en la sección 1.1, y de las grandes reservas existentes de este tipo de residuo, posiblemente el aprovechamiento de los estériles de carbón como materia prima para la obtención de puzolanas en el sector cementero constituya el tipo de simbiosis industrial que implique mayores beneficios, no solamente para las empresas involucradas, sino también para la sociedad en general.

El empleo de los estériles de carbón como base para la obtención de materiales puzolánicos comenzó a explorarse en 2006 por parte de Li *et al.* [81] y, posteriormente en 2012 por Frías *et al.* [82, 83], quienes definieron un protocolo científico-técnico para transformar estos residuos en puzolanas altamente reactivas. Aunque en la última década ha aumentado el número de investigaciones centradas en el aprovechamiento de este residuo [84-87], existe aún una gran laguna científica en este ámbito, sobre todo en lo que respecta a cementos de bajo contenido en clínker y a durabilidad.

2. OBJETIVOS

El presente estudio tiene por objeto estudiar la viabilidad del establecimiento de una simbiosis industrial entre el sector cementero y la minería de carbón, basada en la aplicación de los fundamentos de la Economía Circular. Esta sinergia empresarial tendría como propósito, por un lado, aportar soluciones a los principales problemas del sector del cemento derivados de la escasa sostenibilidad de su proceso de producción y la carencia de materias primas apropiadas para su utilización como puzolana y, por otro lado, buscar una forma alternativa de gestión de los residuos mineros obtenidos en la extracción del carbón de mayor rentabilidad económica, sostenible y medioambiental que los sistemas de tratamiento actuales.

Con este objetivo, en este trabajo se lleva a cabo una valoración de la viabilidad científico-técnica del reaprovechamiento de los estériles generados en la minería del carbón como materia prima secundaria para la producción de puzolanas y su posterior aplicación en la producción de cementos eco-eficientes. Para ello se desarrollan los siguientes objetivos específicos:

- Caracterización y activación de los estériles de carbón para la obtención de una puzolana y estudio de su reactividad.
- Obtención de eco-cementos binarios a partir de la sustitución parcial de un cemento Portland comercial por los estériles de carbón activados a niveles de sustitución del 20 % y 50 %.
- Estudio de la hidratación de los eco-cementos binarios y de sus propiedades físicas y mecánicas.
- Evaluación de la durabilidad de los nuevos eco-cementos basada en el estudio de las propiedades de transporte de agua y la resistencia en ambientes ricos en CO₂ e iones cloruro.
- Estimación de la huella medioambiental y el ahorro energético.