

PRESENTACIÓN

La generación de residuos se incrementa según avanza el desarrollo tecnológico de las sociedades. Sin embargo, este progreso también repercute de forma positiva en la gestión y reutilización de los residuos, de forma que se busquen aplicaciones concretas al uso de los mismos.

En la actualidad, los residuos de construcción y demolición (RCD) constituyen un problema social, técnico y medioambiental debido, por un lado, al gran volumen de residuos generados anualmente, y por otro, a las limitadas aplicaciones que tienen hoy en día.

Su gestión tiene lugar en las plantas de reciclado de RCD en las que, al final de diferentes etapas de separación y procesos de trituración, se obtienen de forma mayoritaria dos tipos de fracciones: un residuo limpio de hormigón y un residuo mixto cerámico que actualmente se emplean principalmente en aplicaciones técnicas como relleno, material de drenaje, base o sub-base de carreteras o como árido reciclado en la fabricación de hormigones más sostenibles.

Debido al gran flujo de residuos que suponen los RCD, la necesidad de mejorar las tasas de reciclaje que presentan y considerando investigaciones previas, donde los desechos cerámicos se emplearon como adiciones puzolánicas con excelentes resultados, se plantea una nueva aplicación para los RCD: *puzolanas alternativas para cementos eco-eficientes*.

El **objetivo principal** es el diseño de nuevos cementos eco-eficientes a partir de la valorización de residuos de construcción y demolición como puzolanas alternativas en el cemento, y su estudio en función de los diferentes porcentajes de material cerámico en su composición. La incorporación de dichos materiales debe ofrecer, además, ventajas tecnológicas en relación a los cementos comerciales tradicionales así como una mejora en las condiciones ambientales y sociales.

De los **resultados** obtenidos se puede concluir: los *residuos de construcción y demolición recogidos* en doce plantas de reciclado españolas presentan diferencias en los tamaños de partícula y en el contenido cerámico, lo que es consecuencia de

flujos intermitentes y poco homogéneos de residuos y a las diferentes necesidades del mercado.

Dicha diversidad hace necesario un acondicionamiento previo de los residuos, consistente en un proceso de secado y molienda para la obtención de finuras adecuadas para su incorporación al cemento.

Todos los RCD analizados presentaban composiciones químicas y mineralógicas así como actividad puzolánica similares y comparables a otros residuos o subproductos industriales actualmente empleados como adiciones activas en el cemento (humo de sílice y ceniza volante).

En relación a la *incorporación de RCD a la matriz de cemento*, es posible destacar que, una vez conocidas las características y propiedades de los RCD, se llevó a cabo el diseño de nuevos cementos eco-eficientes e innovadores basados en la incorporación de dos RCD (W-04 y W-07) en proporciones de sustitución del cemento del 0, 10, 20 y 30%. Estos se eligieron por presentar diferentes contenidos de material cerámico.

Todos los cementos diseñados con estos RCD cumplen con la normativa europea vigente en relación a las propiedades físicas, químicas y comportamiento mecánico.

Además, la incorporación de RCD mejora la durabilidad de los cementos en comparación con el cemento sin adición cuando estos se exponen a disoluciones de sulfato sódico.

Tras el análisis de los resultados, se pueden extraer las siguientes **conclusiones finales**:

Por un lado, los residuos *RCD pueden emplearse como adiciones puzolánicas* en la fabricación de cementos eco-eficientes e innovadores, por composición y puzolanidad semejante a otros residuos y/o sub-productos industriales empleados tradicionalmente, y por otro lado, que la incorporación de *RCD con 100% de contenidos cerámico mejora las prestaciones* de los cementos comerciales sin adición.

Finalmente, los buenos resultados obtenidos han permitido el desarrollo de una patente:

Residuo cerámico útil para la elaboración de cementos, procedimiento de obtención y cementos que lo comprende (ES2512065).

1. INTRODUCCIÓN

El ser humano con sus actividades siempre ha generado residuos. Esto no es un gran problema, cuando la población es relativamente pequeña o nómada. Los problemas surgen cuando los grupos comienzan a formar mayores comunidades y crean urbes cada vez más importantes.

A partir de estas situaciones es cuando la gestión y control de los residuos generados cobra mayor importancia. Las políticas medioambientales poco exigentes a la hora de abordar estas circunstancias pueden desembocar en el futuro en graves situaciones para las sociedades, donde destacan los problemas medioambientales (contaminación de suelos, aguas y aire), así como la deforestación y efectos nocivos para la salud humana. Desde hace siglos, las diferentes epidemias y plagas estaban asociadas con problemas de contaminación de aguas o con la acumulación de animales, que serían capaces de transmitir enfermedades como la peste o la rabia.

Debido a que el bienestar social está asociado al consumo de diferentes productos y, por tanto, de forma directa o indirecta con la generación de residuos, se hace imprescindible aplicar una gestión adecuada de los mismos.

Los residuos, con una buena gestión, se pueden convertir en una fuente de materiales que contribuyen a la preservación de materias primas, a la producción de energía más limpia y económica y a un desarrollo industrial más sostenible, en la línea marcada por las directrices de la Economía Circular.

En España, el Plan Nacional Integrado de residuos (PNIR) [1] para el periodo 2008-2015, pretende servir de guía para el desarrollo de políticas específicas de gestión con el fin de mejorar las existentes actualmente, y como objetivos generales presenta:

- Modificar la tendencia actual del crecimiento en la generación de residuos.
- Erradicar el vertido ilegal.
- Fomentar la prevención y la reutilización, el reciclado de la fracción reciclable, así como la valorización de la fracción de los residuos no reciclable.

- Completar las infraestructuras de tratamiento y mejorar el funcionamiento de las ya existentes.
- Obtener estadísticas fiables en materia de infraestructuras, empresas gestoras y producción y gestión de residuos.
- Evaluar los instrumentos económicos y en particular los fiscales que se han puesto en práctica para promover cambios en los sistemas de gestión existentes. Identificar la conveniencia de su implantación de forma armonizada en todas las Comunidades Autónomas.
- Consolidar los programas I+D+i aplicados a los diferentes aspectos de la gestión de los residuos, que incluyen el análisis de la eficiencia de los sistemas de recogida, optimización de los tratamientos y evaluación integrada de los procesos completos de gestión, desde la generación hasta la eliminación.
- Reducir la contribución de los residuos al Cambio Climático y fomentar la aplicación de las medidas de mayor potencial de reducción.

Uno de los tipos de residuos que se encuentran incluidos dentro del PNIR es el correspondiente a los residuos de construcción y demolición (RCD), que son el objeto de estudio de la presente monografía.

1.1. Residuos de construcción y demolición

Los residuos de construcción y demolición (RCD) están regulados por una legislación específica aplicable por la que se regula la producción y gestión de este tipo de residuos (RD 105/2008 de 1 de febrero) [2]. Esta legislación supone un paso más en la creciente preocupación e interés medioambiental que la Administración central y las Comunidades Autónomas llevan mostrando desde hace varios años por este tema, y que tuvo su máxima expresión con el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición para el periodo comprendido entre el 2001-2006 (PNRCD) [3], en el que se abordaba el

tratamiento, recuperación y reciclado de este tipo de desechos. Estos planes han sido sustituidos por el ya mencionado PNIR, cuyo Anejo 6 corresponde al II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición para el periodo comprendido entre el 2008-2015 (II PNRCD).

Dentro de los objetivos del PNIR en relación a los RCD, se encuentran:

- Recogida controlada y correcta gestión del 95% de los RCD a partir de 2011.
- Reducción o reutilización del 15% de RCD en 2011.
- Reciclaje del 40% de RCD a partir de 2011.
- Valorización del 70% de los residuos de envases de materiales de construcción a partir de 2010.

Además, con el objetivo prioritario de ayudar a coordinar una situación de falta de control administrativo y de disparidad en la normativa entre diferentes territorios, que no hace sino perjudicar al medio ambiente, se ha aprobado el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 [4].

Por otro lado, también se propone priorizar las iniciativas sobre I+D+i en lo relativo al desarrollo de mejoras tecnológicas para el tratamiento de los RCD, así como la búsqueda de salidas y usos comerciales de los materiales procedentes del tratamiento de los RCD.

Se convierte en obligatorio, a partir de dicho Real Decreto, la incorporación de un estudio de gestión de RCD en el proyecto de obras de edificación o construcción, que contenga como mínimo una es-

timación de la cantidad de residuos producida, así como medidas adoptadas para su prevención, procesos de gestión y valorización de estos desechos. Se señala, además, que las operaciones preferentes para este tipo de residuos, son la reutilización y el reciclado.

La reutilización y el reciclaje incluyen, además, una valorización en la que se remarca que el empleo de los RCD como áridos posible minimizar los problemas que pueden suponer las restricciones existentes para la apertura de nuevas canteras y, además, conseguir un ahorro de recursos naturales.

Por lo tanto, se destaca la importancia que tiene la redacción de planes de actuación en relación a los RCD, ya que representan un volumen de residuos muy significativo de ámbito mundial, y particularmente en Europa, donde se generan 530 millones de toneladas anuales aproximadamente, de las cuales 35 millones corresponden a las generadas en España [5]. Esta producción de RCD equivale al 25-30% del total de residuos sólidos generados [6].

Como consecuencia, la reducción o prevención debe ser la primera opción durante la gestión, seguida de la reutilización, reciclado y valorización (valorización energética incluida). La última opción contemplada es la eliminación en vertederos, con el objetivo final de alcanzar una sociedad sostenible [7] basada en las 3Rs [8].

Principalmente, los RCD están formados por una fracción pétreo (75%), predominando entre estos los residuos de naturaleza cerámica (54% del total) tal y como se muestra en el gráfico de la Figura 1 [3].

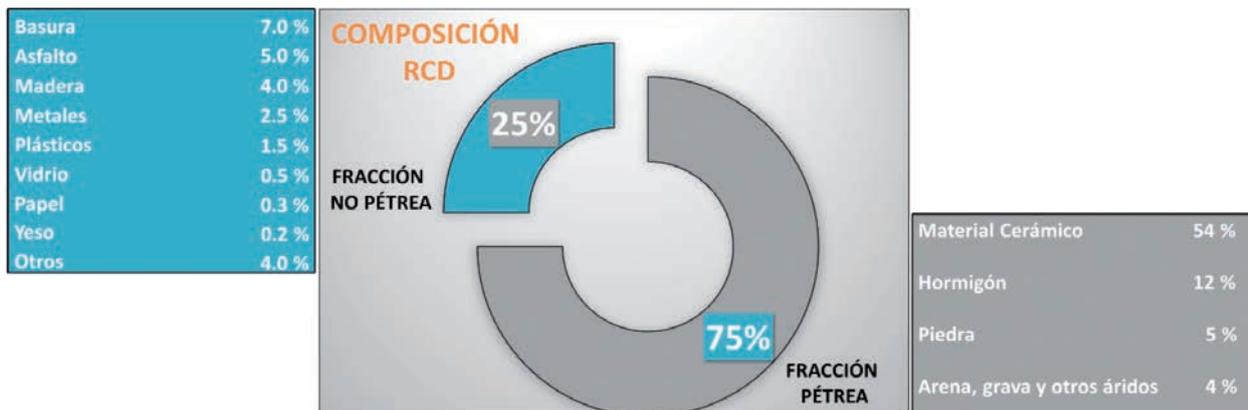


Figura 1. Composición de los RCD.

1.2. Aplicaciones actuales de los RCD

Actualmente los RCD presentan dos tipos de aplicaciones principales. Estas se han diseñado para el empleo de los áridos reciclados en usos no ligados y en los usos ligados, tal y como queda recogido en la Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD (Proyecto GEAR) [9].

1.2.1. Los RCD en usos no ligados

Los principales usos no ligados para los áridos reciclados, según a la clasificación que establece el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-03) [10] se pueden agrupar en dos grandes grupos: explanaciones (y rellenos) y firmes.

Posiblemente, sean estas aplicaciones las menos investigadas, aunque son a las que más producción de árido reciclado se destina, con lo que se llega a alcanzar entre el 80-95% de la producción total [9]. Expertos de todo el mundo encaminan sus investigaciones hacia la búsqueda de aplicaciones para los residuos de construcción y demolición en lo que a usos no ligados se refiere.

Jiménez *et al.* [11] obtuvieron buenos resultados sobre el comportamiento e impacto medioambiental de áridos reciclados, basados en residuos de construcción y demolición para la construcción de tramos de carreteras rurales sin pavimentar en comparación con áridos naturales.

El empleo de los RCD como base o sub-base de carreteras, también fue estudiado por Vegas *et al.* [12] con evaluación de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de este tipo de áridos reciclados, Rahman *et al.* [13] enfocaron sus investigaciones hacia el empleo de tres tipos de RCD (ladrillos machados, árido de hormigón reciclado y basados en asfalto) en sistemas de pavimentos permeables, aprovechando las propiedades drenantes de este tipo de materiales.

1.2.2. Los RCD en usos ligados

En España, la normativa que regula los usos ligados es la Instrucción Técnica del Hormigón (EHE) [14] y los artículos referidos a pavimentos en el Pliego General de Condiciones (PG-03) [10].

Previa a la redacción de dicha instrucción, se llevaron a cabo un gran número de investigaciones, con la finalidad de evaluar la influencia que este tipo de áridos reciclados procedentes de los RCD tenían sobre el hormigón.

En 1996 aparece la primera tesis doctoral nacional, realizada por Barra [15], en la que recoge la producción de hormigones con árido reciclado con buenas prestaciones en resistencia y durabilidad, lo cual requiere el conocimiento de las características del árido reciclado y ajustar a ellas los procesos de dosificación y producción. Gómez *et al.* [16] estudiaron un hormigón reciclado con sustitución parcial de áridos naturales por los áridos reciclados de hormigón. En 2000, Natalini *et al.* [17] concluyen que la reutilización de los RCD lleva a un ahorro en los costes de la construcción reduciendo los gastos de transporte, lo cual representa un ahorro de materiales y recursos naturales. En 2001, Parra [18] presentó su tesis doctoral encaminada a la caracterización de RCD de la Comunidad de Madrid como áridos reciclados para la fabricación de hormigones. Entre otras, llegaron a la conclusión de limitar el contenido de árido reciclado en función de su naturaleza para que la mezcla desarrolle unas propiedades aceptables del hormigón reciclado. En 2002, se presentó otra tesis doctoral realizada por González [19] en la que se concluyó con la posibilidad de obtener hormigones reciclados estructurales mediante la sustitución del 50% de los áridos gruesos por áridos reciclados.

Ryu [20] estudió los efectos que tenían los áridos reciclados sobre las características de resistencia del hormigón.

En 2003, Parra *et al.* [21] describieron el modo de elaborar un hormigón a escala industrial con áridos reciclados. En este mismo año, Alaejos y Sánchez [22, 23] iniciaron distintas investigaciones encaminadas a fijar los requisitos que deben cumplir los áridos reciclados procedentes de hormigón estructural.

Estos estudios han desembocado en la EHE-08, normativa de obligado cumplimiento para el proyecto y ejecución de hormigón estructural.

En el Anejo 15 de la citada Instrucción se recoge, por primera vez, las recomendaciones específicas sobre la utilización de árido reciclado procedente de machaqueo de residuos de hormigón, para su empleo en hormigón estructural, en la que se limita el contenido de árido reciclado hasta un 20% de sustitución del árido natural.

Por otro lado en 2013, Wagih *et al.* [24] estudiaron la sustitución de RCD como árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural en Egipto, y demostraron que sustituciones del 25% no producían cambios significativos en las propiedades del hormigón; mientras que las propiedades de los hormigones resultaban alteradas cuando la sustitución

era del 100%. En el Anejo 18 de la EHE-08 se presenta la sustitución del 100% solo para el empleo del hormigón no estructural.

En ninguno de los casos se contempla la posibilidad de llevar a cabo sustituciones de árido natural por RCD de naturaleza cerámica. Muchos investigadores enfocan sus trabajos en el estudio de RCD de diferente naturaleza al árido procedente del hormigón, con lo que se amplía el abanico de posibilidades que este tipo de residuos ofrece, con el objetivo de evaluar el empleo de estas nuevas tipologías de árido en la fabricación de hormigones.

Así, en el año 2008, Gomes y de Brito [25] estudiaron los hormigones estructurales con la incorporación de árido reciclado de hormigón y árido cerámico procedente de la demolición de un muro en el desarrollo de la durabilidad de los hormigones fabricados.

En 2011, Yang *et al.* [26] estudiaron la influencia que los niveles de ladrillo machacado junto con árido procedente de los residuos ejercen sobre las propiedades de los hormigones fabricados, para poder establecer los límites para los cuales las propiedades del hormigón resultan alteradas respecto a hormigones fabricados con árido natural o con cierto porcentaje de árido machacado de los residuos de hormigón.

A partir del 2012, Medina *et al.* [27, 28] comenzaron a estudiar la sustitución del árido natural por árido grueso reciclado, formado por residuos procedentes de la industria cerámica de sanitarios. Estos materiales, debido a sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, presentaban una excelente alternativa al empleo de áridos de otra naturaleza. Los resultados obtenidos durante las investigaciones, con sustituciones de 15, 20 y 25 % de árido natural, dejaron clara la viabilidad de su empleo en la producción de hormigones con propósitos estructurales.

Bogas *et al.* [29] han estudiado, además, la influencia que tiene la procedencia del árido a la hora de fabricar hormigones reciclados. Con la finalidad de evaluar la influencia que los áridos reciclados pueden tener sobre las propiedades de los hormigones fabricados, Medina *et al.* [30] por un lado, estudiaron el empleo de áridos reciclados de baja calidad, formados por la fracción de hormigón, asfalto (19%), árido no ligado (28%) y residuos basados en arcilla (5%) y con la posibilidad de presentar partículas flotantes, con sustituciones del 25 y 50% para fabricación de hormigones con resistencias y durabilidad suficientes para la construcción de viviendas. Por otro lado, se han realizado ensayos relacionados con la durabilidad [31].

Más del 50% de los RCD obtenidos tras los tratamientos de gestión corresponden con la fracción cerámica y están compuestos mayoritariamente por ladrillos y mortero adherido. Actualmente, este tipo de residuos, al no encontrarse recogidos en la EHE-08, en la mayoría de las ocasiones, se reducen las posibilidades de su reutilización. En este sentido, y con la finalidad de otorgar posibles salidas comerciales a esta fracción cerámica, Zong *et al.* [32] evaluaron el aumento de la permeabilidad al agua, aire y a la difusión de los cloruros de un hormigón reciclado usando ceniza volante y residuo procedente de ladrillos como árido.

Ledesma *et al.* estudiaron el empleo de arena procedente de estos residuos, en la fabricación de morteros eco-eficientes [33]. Los resultados de las investigaciones previas llevadas a cabo, donde los RCD de diversa tipología se emplean en matrices cementantes como áridos reciclados en el hormigón con buenas prestaciones y propiedades, dan lugar a valorar la posibilidad existente de ampliar la aplicabilidad de dichos residuos, que tal y como ha sido explicado, suponen un importante flujo de residuos en todo el mundo. Esta idea, acompañada de la conciencia existente acerca de que el sector cementero ha sido considerado históricamente como un sector poco respetuoso con el medio ambiente, pero que a su vez posibilita el reciclado de distintos tipos de residuos y/o subproductos industriales a lo largo de su proceso industrial (materias primas, correctores, combustibles, adiciones) abren una nueva vía para los RCD.

1.3. Industria cementera

La industria cementera ofrece multitud de posibilidades a lo largo de todo el proceso de fabricación del cemento, en lo que al aprovechamiento de residuos, y/o subproductos industriales se refiere, con el objetivo principal de conseguir procesos más eficientes y sostenibles [34, 35]. La Figura 2 [36] muestra un esquema del proceso de fabricación de cemento.

La utilización de diferentes materiales como *materias primas alternativas* ya está implantada con el fin de reducir la explotación que tiene lugar en las canteras. Los materiales que principalmente se emplean son calizas, arcillas o su mezcla natural (margas). La roca basáltica, cuyo uso es limitado, se ha considerado materia prima alternativa al empleo de arcillas en la producción de clínker [37].

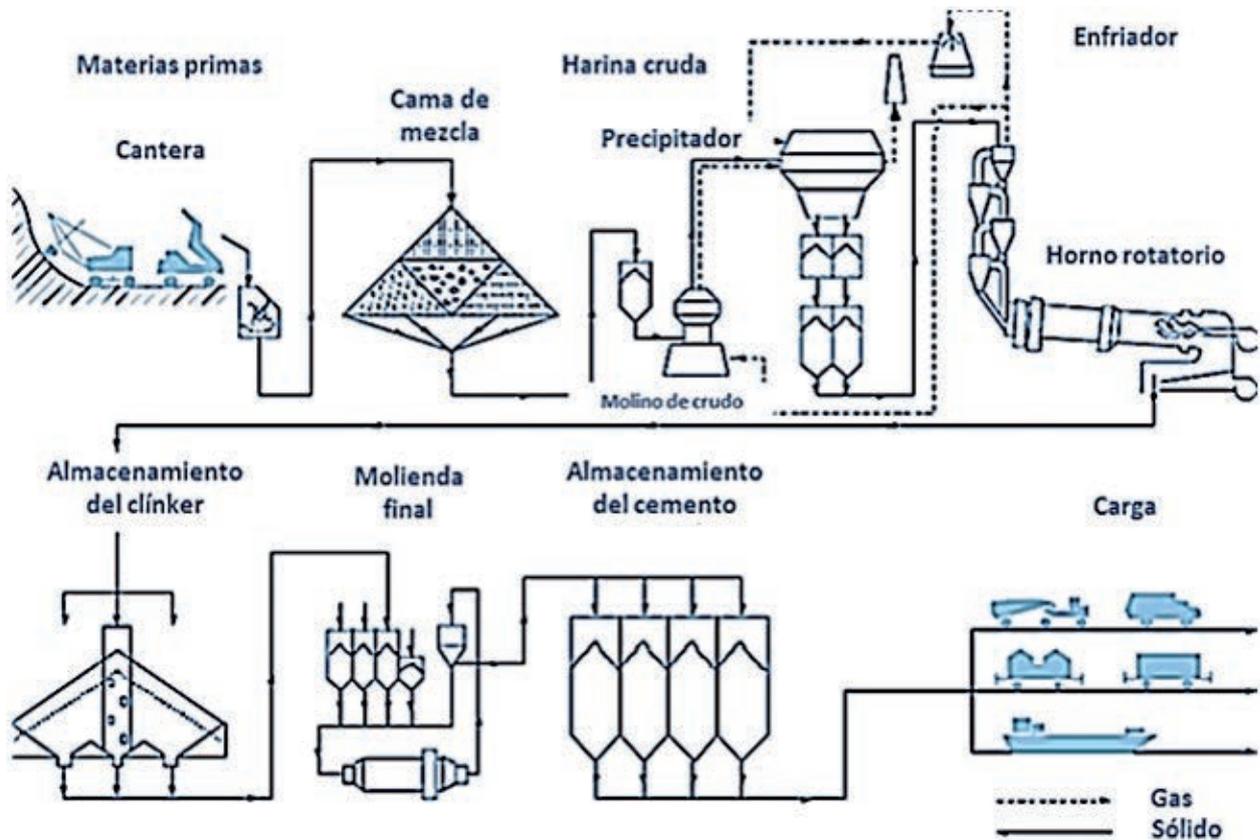


Figura 2. Esquema del proceso de fabricación del cemento desde la cantera a la distribución.

Ca	Limestone / marl / chalk Others, such as: - lime sludge from drinking water and sewage treatment - hydrated lime - foam concrete granulates - calcium fluoride	Si-Al-Ca	Granulated blastfurnace slag Fly ash Oil shale Trass Others, such as: - paper residuals - ashes from incineration processes - mineral residuals, e. g. soil contaminated by oil
Si	Sand Used foundry sand	S	Natural gypsum Natural anhydrite Gypsum from flue gas desulpherisation
Si-Al	Clay Bentonite / kaolinite	Al	Input materials from the metal industry, such as: - residues from reprocessing salt slag - aluminium hydroxide
Fe	Iron ore Other input materials from the iron and steel industries, such as: - roasted pyrite - contaminated ore - iron oxide/fly ash blends - dusts from steel plants - mill scale		

Figura 3. Materias primas alternativas comúnmente empleadas en la industria cementera en Alemania.

En la Figura 3 [38], se muestra a modo de ejemplo materias primas alternativas empleadas en la industria cementera alemana en el año 2009. La mayoría de estos materiales, pueden ser empleados también como *correctores* de materias primas.

Los *combustibles alternativos* que se emplean principalmente en la industria cementera son:

- Neumáticos al final de su vida útil, procedentes de la industria del automóvil que, debido a su alto contenido en carbón, elevado valor calorífico y baja humedad, hacen de estos residuos unos de los combustibles alternativos más empleados [36], incluso los alambres de refuerzo de los propios neumáticos pueden emplearse como materia prima alternativa, sustituyendo a fuentes naturales de hierro [39].
- Los recubrimientos de carbón agotados (en inglés, *spent carbon lining, SCL*), son residuos sólidos que se producen durante la fabricación del aluminio en las celdas electrolíticas. Hasta el 79% de los SCL generados en Estados Unidos se recicló en los hornos de cemento [40]; 7449 toneladas de SCL, en 2009, se reciclaron en Australia como combustible alternativo [41].
- Los lubricantes industriales también se emplean como combustibles alternativos debido a su elevado poder calorífico, con lo que se minimizan los costes del proceso [42]. En la mayoría de los casos, estos lubricantes alcanzan valores caloríficos superiores a los del carbón empleado de forma tradicional.
- Lodos de aguas residuales y residuos animales [43] también se emplean igualmente como combustibles alternativos en la industria cementera.

En la Figura 4 [44] se muestra la utilización de combustibles alternativos en Europa en el año 2012.

Por último, en la etapa final del proceso, con la incorporación de *adiciones activas al cemento*, muchos son los residuos y sub-productos industriales incorporados. La incorporación de este tipo de materiales tiene tres claras ventajas:

- Reducción del contenido de clínker necesario por tonelada de cemento fabricado, y, por lo tanto, disminución de los efectos que la fabricación del cemento provoca (explotación de canteras, consumo de combustibles fósiles, emisiones de gases de efecto

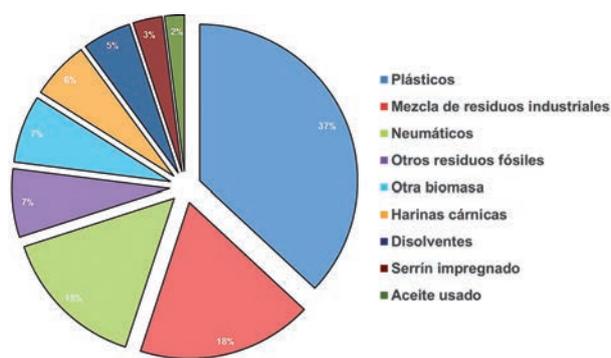


Figura 4. Combustibles alternativos empleadas en la industria cementera en Europa.

invernadero a la atmósfera, etc.)

- Valorización de residuos y/o sub-productos industriales
- Mejora de las propiedades de los cementos mezcla

La normativa europea vigente (EN 197-1) [45] recoge claramente las adiciones que se pueden utilizar para la comercialización de cementos en Europa:

- escoria de horno alto
- humo de sílice
- cenizas volantes (silíceas o calcáreas)
- esquistos calcinados
- caliza
- puzolanas (naturales o calcinadas)

1.4. Puzolanas

El término *puzolana* se usa genéricamente para definir unos materiales que, sin ser cementicios *per se*, contienen constituyentes que, a temperatura ambiente y combinados con la cal en presencia de agua, forman compuestos estables e insolubles que se comportan como conglomerantes hidráulicos [45, 46]. El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ necesario para dicha reacción puzolánica puede proceder directamente de la cal hidratada o de la hidratación del cemento portland.

Los orígenes de la utilización de puzolanas (tierras de Santorín) en morteros de cal datan del siglo IV a. C. en la antigua Grecia. Posteriormente, los romanos descubren que ciertos suelos volcánicos procedentes de la comarca de Pozzuoli (a los pies del Vesubio) [47], al mezclarse con cal producían excelentes conglomerantes hidráulicos.

Las puzolanas se han venido empleando desde la Antigüedad. Ya los romanos levantaron multitud

de edificaciones como panteones, coliseos, estadios, basílicas, acueductos o puentes mediante el empleo de este tipo de materiales junto con la cal. Estas edificaciones se han conservado hasta nuestros días

El empleo de puzolanas se puede justificar desde diversas perspectivas:

- **Técnica:** en función de su naturaleza, las puzolanas pueden otorgar a los cementos características especiales, en particular la mejora de su comportamiento durable [46, 48, 49]. Esto se debe a que la cal de hidrólisis (portlandita) de los silicatos cálcicos del cemento se combina con los componentes ácidos de la puzolana (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3), con lo que da lugar a silicatos y aluminatos similares a los formados a partir del cemento portland.
- **Económica:** las puzolanas se incorporan al final del proceso, durante la molienda del cemento, sin necesidad de pasar por el proceso de *clinkerización*, con el consecuente ahorro en energía.
- **Medioambiental:** Al reducir el contenido de clínker necesario por tonelada de cemento, se reduce a su vez el combustible que se consume en el horno y se da lugar a menores emisiones de gases a la atmósfera, lo que está en consonancia con la política ambiental mundial, en la lucha contra el cambio climático y el esfuerzo de que la Unión Europea alcance el objetivo de la reducción del 80-90% de los gases de efecto invernadero en 2050 [50–52].

Sin embargo, la disponibilidad de las puzolanas tradicionales está disminuyendo debido a una explotación menos extensiva e intensiva, así como por una tendencia a la baja en el establecimiento de nuevos emplazamientos y en un intento de disminuir el impacto paisajístico y ambiental que esa explotación genera.

Las políticas medioambientales, además, buscan minimizar la acumulación de residuos, y dan prioridad, por tanto, al reciclado de residuos y/o subproductos industriales para su empleo en la fabricación de cemento.

1.4.1. Clasificación de las puzolanas

Hacer una clasificación precisa de las puzolanas no es una tarea fácil, ya que bajo esta denominación se abarca materiales de distintos orígenes y composiciones, tanto química como mineralógica. Por tanto, en

la bibliografía se pueden encontrar diversas clasificaciones, como las realizadas por Calleja [47], Masazza [53, 54], Sersale [55] o Soria [56]. Sin embargo, todas coinciden en clasificar las puzolanas en *naturales* y *artificiales* atendiendo a su origen.

- Puzolanas artificiales

Las puzolanas basadas en residuos y/o subproductos industriales son las denominadas *puzolanas artificiales* [57], que constituyen dos grandes grupos: las generadas en procesos industriales: humo de sílice (SF), ceniza volante (FA), escorias de cobre, de silicio y manganeso, ceniza de caldera (BA) y catalizadores de craqueo catalítico (FCC); y las obtenidas a partir de residuos agro-industriales: cenizas de cáscara de arroz, cenizas de caña de azúcar, lodos de papel activados o bambú. Son muchos los investigadores que han centrado sus trabajos en el desarrollo y conocimiento de este tipo de materiales como adiciones puzolánicas. Así Frías *et al.* [58] han estudiado la influencia que la incorporación de escorias silico-manganésicas tienen sobre la durabilidad de cementos con adición, Cherif *et al.* [59], y Sanjuan y Menéndez [60], han estudiado el empleo de mezclas de ceniza de caldera y cenizas volantes en cementos mezcla. El empleo de FCC como adición puzolánica en el cemento ha sido ampliamente estudiado por Pacewska *et al.* [61] y Payá *et al.* [62]. García de Lomas *et al.* [63] estudiaron la influencia que la incorporación de los FCC en el cemento ejerce sobre el calor de hidratación en los morteros.

Muchos son las investigaciones llevadas a cabo en la última década enfocadas a los residuos agro-industriales y su valorización como puzolanas, de esta forma, un claro ejemplo, son los estudios llevados a cabo por Frías *et al.* [64, 65], García *et al.* [66] y Vigil *et al.* [67] establecieron las bases científicas, técnicas y medioambientales para la reutilización de residuos papeleros como adición activa al cemento.

La investigación acerca de las cenizas de cáscara de arroz, aunque ya estudiadas a mediados de la década de los ochenta [68] se está incrementando en el último lustro, por lo que se estudian tanto las condiciones de calcinación de este residuo agro-industrial para con-

seguir las mejores propiedades puzolánicas, como los efectos que su incorporación tiene sobre la estructura y microestructura en los sistemas cementicios [69–72]. La ceniza procedente de la calcinación de la caña de azúcar también ha sido ampliamente estudiada, tanto la procedente de la paja de la caña de azúcar como la procedente del bagazo, con la finalidad de reutilizar la gran cantidad de cenizas debidas a la combustión de estos residuos (15 millones de toneladas) [73–78].

- **Puzolanas naturales**

Según la literatura sobre los análisis químicos [79–85], los diferentes tipos de puzolanas naturales no difieren demasiado en este sentido; sus componentes mayoritarios son la sílice, alúmina y el óxido de hierro. Sin embargo, los porcentajes correspondientes de estos óxidos, al igual que la pérdida por calcinación, puede variar de unas puzolanas a otras dependiendo del tipo de puzolana y de su origen.

A su vez, las puzolanas naturales se pueden subdividir en:

- **Volcánicas:** son puzolanas naturales de origen mineral surgidas de erupciones volcánicas explosivas depositándose en los alrededores del volcán. En función de la viscosidad, de la velocidad de enfriamiento y del contenido de gases del magma fundido original surgen: Las cenizas, la piedra pómez, las escorias y las bombas.
- **No volcánicas:** son aquellas que proceden de rocas de simple depósito como las arcillas y la sílice amorfa o las tierras de diatomeas, compuestas de esqueletos silíceos de microorganismos, depositados en el agua del mar (origen orgánico).
- **Origen mixto:** son los materiales que proceden de rocas compuestas estratificadas de distinto origen (volcánico, sedimentario y orgánico).

Además, se pueden definir como *puzolanas naturales calcinadas* según la normativa española y europea [45], a aquellos materiales volcánicos,

arcillas, esquistos o rocas sedimentarias que sufren una activación térmica.

Es conocido que los materiales arcillosos, inertes en un comienzo, alcanzan una gran actividad puzolánica, cuando son térmicamente activados a temperaturas entre 600 y 900 °C, y molidos a la misma finura que el cemento. Su composición se basa principalmente en sílice y alúmina, y la pérdida del agua combinada durante la calcinación destruye la red cristalina de las arcillas, y da lugar a materiales amorfos e inestables, siendo esta inestabilidad térmica la responsable de su actividad puzolánica [86].

Un claro ejemplo dentro de la familia de los filosilicatos es la caolinita, después de activarse térmicamente (entre 500 y 700 °C), se transforma en metacaolinita, producto con elevada actividad puzolánica [87–92].

Por otro lado, la fabricación de materiales cerámicos (entre otros, tejas, ladrillos y azulejos) implica este tipo de procesos en las arcillas empleadas como materias primas. La industria cerámica produce millones de toneladas de estos materiales, de los cuales una fracción —por defectos durante el proceso de fabricación (defectos dimensionales o fallo en las temperaturas de cocción)— se considera desechos. Investigaciones llevadas a cabo por Sánchez de Rojas *et al.* [93–95], Ay y Únal [96], Gonçalves *et al.* [97] y Lavat *et al.* [98], entre otros, muestran que la composición química y mineralógica de este cascote cerámico es similar a la de otros materiales empleados como puzolanas, así como su buen comportamiento puzolánico.

Los buenos resultados obtenidos por los investigadores con el empleo del cascote cerámico como adición puzolánica, y la similitud evidente entre estos residuos y los RCD de base cerámica, hacen que se plantee la posibilidad de emplear estos RCD de base cerámica como adición puzolánica, considerándolos como puzolanas naturales calcinadas.

De esta manera, por un lado, sería posible ampliar las aplicaciones en las que hoy en día se emplean estos residuos y que han sido ampliamente descritas en la introducción y, por otro lado, dar una solución a los problemas generados por la dificultad en la explotación de las canteras para la obtención de puzolanas naturales debido al impacto que dicha explotación supone para el paisaje.