

## 1. Introducción

El cemento Pórtland es el conglomerante hidráulico más utilizado en el mundo, con una producción mundial anual de unas  $3,0 \cdot 10^9$  toneladas (2009) (1). Este cemento se obtiene por pulverización de un producto que recibe el nombre de *clinker*, al que se le adiciona un pequeño porcentaje de un regulador de fraguado, que generalmente es el yeso  $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . A su vez, el clinker es el resultado de la cocción a  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ - $1500\text{ }^\circ\text{C}$  de una mezcla de calizas y arcillas denominada *crudo*.

La fabricación del cemento Pórtland conlleva una serie de efectos adversos, entre otros, un elevado consumo energético (térmico y eléctrico), debido a las elevadas temperaturas (superiores a los  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ ) necesarias para completar todas las reacciones químicas que conducen a la formación del clinker de cemento Pórtland, así como los procesos de molienda de las materias primas y los componentes del cemento final. La energía térmica necesaria para la fabricación de una tonelada de clinker oscila entre  $3000$ - $6500\text{ MJ/t}$ , por ello es necesario el consumo de grandes cantidades de combustibles, como carbón, petróleo, coque y gas natural.

Adicionalmente, la industria cementera es también una industria altamente contaminante, debido a las grandes cantidades de materias primas necesarias para la fabricación del crudo de cemento, lo que conlleva la explotación de los recursos naturales limitados (canteras) y elevadas emisiones a la atmósfera de gases y partículas. En la producción de una tonelada de clinker son necesarias  $1,7\text{ t}$  de materias primas (calizas, margas y arcilla), lo que supone una intensa explotación de los recursos naturales disponibles. También, durante el proceso de fabricación del clinker de cemento Pórtland, se emiten a la atmósfera una gran cantidad de gases contaminantes tales como  $\text{CO}_2$  y, en menor medida,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$ . Algunos de estos gases son causantes del efecto invernadero, siendo el  $\text{CO}_2$  el gas con un mayor impacto medioambiental. Las emisiones de este gas están asociadas principalmente a dos factores: los procesos de descarbonatación de la caliza —que es el constituyente mayoritario del crudo de cemento, superando el 60% de la emisión total— y las emisiones debidas a los combustibles y a la energía eléctrica. Se emiten a la atmósfera alrededor de  $870\text{ Kg de CO}_2/\text{t de cemento}$ . Siendo la industria cementera la responsable del 7% de las emisiones antropogénicas globales de  $\text{CO}_2$ .

Debido a los problemas medioambientales que conlleva la producción del cemento Pórtland, la industria cementera está implicada en la búsqueda de vías de producción alternativas que permitan alcanzar un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin poner en peligro las capacidades de las generaciones futuras y cumplir lo acordado en el Protocolo de Kyoto (1997), es decir, la disminución entre 2008-2012 de un 5,2% de las emisiones de los gases con efecto invernadero respecto a los valores emitidos en 1990.

Para ello se está estudiando el desarrollo de cementos que precisen menor energía en su fabricación, degraden menos el entorno y emitan menos gases contaminantes a la atmósfera. Uno de los caminos que se está siguiendo para alcanzar un desarrollo sostenible y el cumplimiento del Protocolo de Kyoto es el empleo de residuos y subproductos industriales como materiales alternativos en los procesos de fabricación, ayudando a su vez a la valorización y eliminación de los mismos (2). Estos materiales alternativos pueden sustituir parcialmente a los combustibles (3-5), a las materias primas (6-8) y al clinker en la composición final del cemento (9-11).

Las fábricas de cemento han resultado ser un medio adecuado y controlado para el reciclado y valorización energética de una gran cantidad de residuos sólidos y líquidos, lo que conlleva grandes ventajas: una disminución de los efectos negativos de la producción del cemento y una gestión adecuada de los residuos y subproductos industriales producidos (2,12).

El empleo de estos residuos y subproductos industriales en el proceso de fabricación del cemento implica la necesidad de un estudio para conocer las condiciones en las que deben incorporarse los diferentes materiales alternativos y poder garantizar la calidad del clinker y del cemento.

El presente trabajo de investigación está encaminado hacia el desarrollo de cementos que minimicen el impacto medio ambiental que provoca la producción de cemento Pórtland, mediante la sustitución parcial de las materias primas del crudo por residuos cerámicos. En este trabajo se muestran los resultados de reactividad y aptitud a la cocción de crudos de cemento Pórtland que incorporan residuos cerámicos como materias primas alternativas.

## 1.1. CEMENTO PÓRTLAND: CLINKER DEL CEMENTO PÓRTLAND

El cemento Pórtland es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente dividido que, amasado convenientemente con agua, forma una pasta que fragua y endurece en función de una serie de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua (13).

Durante el proceso de clinkerización (1450 °C-1500 °C), la mezcla de las diferentes materias primas se combina para obtener las distintas fases mineralógicas del clinker. Las fases son: el silicato tricálcico ( $C_3S$ )<sup>1</sup>, silicato bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y una disolución sólida de ferritos-aluminatos cálcicos que se acerca con frecuencia a la composición  $C_4AF$ .

Los productos de hidratación de las fases mineralógicas del clinker de cemento Pórtland son los responsables de las propiedades físicas, químicas y mecánicas que desarrolla el cemento hidratado y endurecido.

<sup>1</sup> En el presente trabajo de investigación se ha utilizado tanto en el texto como en las tablas, figuras y diagramas la nomenclatura habitual en la química del cemento, que consiste en representar cada óxido, cuando forma parte de un compuesto, como una letra.

C = CaO	H = H <sub>2</sub> O
A = Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s = SO <sub>3</sub>
S = SiO <sub>2</sub>	F = Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>