

SUSTAINABILITY IN THE PRODUCTION OF CEMENT IN SPAIN: ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION AND CO₂ EMISSIONS

Mel Fraga, José¹; Del Caño Gochi, Alfredo²; De la Cruz López, M.Pilar²

¹ Ministerio de Defensa, ² Universidad de La Coruña

Cement manufacturing is an industrial process with heavy environmental impact, due to the high energy demand and high carbon dioxide emissions associated to its production. In order to make a correct characterization of these parameters, a very complete set of data (production, raw materials, fuel and electricity consumption) from the 35 plants operating in Spain in 2006-2010 has been studied. Results indicate an energy consumption range of 3,225-6,012 GJ/t and an emission range of 0,581-0,997 tCO₂/t. These results are of interest for its use in the sustainability assessment of mortars and structural concrete, in accordance with the Spanish reality.

Keywords: *Cement; Clinker; Energy consumption; CO₂ emissions; Spain*

SOSTENIBILIDAD EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTO EN ESPAÑA: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS EMISIONES DE CO₂

La producción de cemento es un proceso industrial de fuerte impacto ambiental, debido a la gran cantidad de energía que demanda y a las emisiones de dióxido de carbono que lleva asociadas. Para caracterizar adecuadamente los parámetros anteriores, se han analizado los datos de producción, materias primas, consumo de combustibles y consumo eléctrico registrados por las 35 plantas españolas en funcionamiento entre los años 2006 y 2010. Los cálculos ofrecen como resultado consumos energéticos de 3,225-6,012 GJ/t y emisiones de 0,581-0,997 tCO₂/t. Estos resultados son de interés para el uso en la evaluación de la sostenibilidad de morteros y estructuras de hormigón, de forma que se ajuste a la realidad española.

Palabras clave: *Cemento; Clinker; Consumo energético; Emisiones CO₂; España*

1. Introducción. Breve descripción del sector cementero español

La primera patente del cemento Portland data de 1824, y la producción industrial de cemento, iniciada durante la segunda mitad del siglo XIX, ha mantenido un progresivo crecimiento a nivel mundial desde los años 50 del siglo pasado. En el año 2006 la producción mundial se elevó a 2.560 millones de toneladas, de las cuales casi la mitad (más del 47%) se produjeron en China y 267 millones fueron producidas en la Unión Europea (Schorcht et al., 2013). En ese mismo año, las plantas españolas produjeron 54 millones de toneladas (el 20% de toda la producción de la UE), y el consumo en nuestro país ascendió a 55,9 millones de toneladas, según la Asociación de Fabricantes de Cemento de España, OFICEMEN (2006). La referida producción mundial se correspondió con un máximo del consumo per cápita, alcanzando los 1.278 kg / habitante, según la Federación Interamericana de Cemento, FICEM (2012).

España no ha sido un país pionero en cuanto al desarrollo tecnológico de esta industria, ya que desde sus orígenes el sector ha dependido de la importación de tecnología y maquinaria de fabricantes foráneos; en sus inicios la industria estuvo dominada por empresas danesas, alemanas o norteamericanas. Sin embargo, nuestro país se incorporó a la fabricación de este nuevo material relativamente pronto, con una primera fábrica inaugurada en Asturias en 1898, perteneciente a Tudela-Veguín; y durante los primeros años del siglo XX nacieron empresas y fábricas que en la actualidad todavía continúan configurando una parte importante del sector. Pueyo (1996) y Rosado (1997) se acercan a la industria española del cemento desde el punto de vista de la historia económica, y aportan parte de los datos citados a continuación.

Tras unos comienzos con un crecimiento moderado, como corresponde a la introducción de un nuevo producto en el mercado, la industria del cemento se desarrolló de una forma paralela a los ciclos económicos del país. Su primer gran impulso tuvo lugar en la década 1920-30, durante la cual se pasó de 19 a 30 fábricas en operación y se incrementó notablemente la producción, a causa de la expansión económica y los grandes proyectos de infraestructuras públicas; de 170.892 t en 1910 se pasó a 318.635 t en 1920 y 1.533.442 t en 1930. A este desarrollo siguió una década de caída y estancamiento, correspondiente a la crisis mundial iniciada en 1929 y, posteriormente, a la Guerra Civil de 1936-39. Durante la posguerra el crecimiento fue muy lento, a pesar de la demanda de materiales para la reconstrucción; así, por ejemplo, la producción en 1944 y 1945 fue muy similar a la de 1930). Esto se debió a la precariedad general del país, la escasez de suministros energéticos y materiales, la falta de divisas y las trabas a las importaciones de maquinaria y repuestos. Posteriormente, entre 1950 y la primera crisis del petróleo, acaecida durante la década de los 70, la industria del cemento vivió una gran etapa de crecimiento paralelo al del conjunto de la economía española, pasando de 2.042.647 t en 1950 a 5.058.194 t en 1960, 16.002.659 t en 1970 y 28.846.552 t en 1978. La crisis de los 70 impulsó a los fabricantes de cemento españoles a exportar parte de su producción, al ver disminuir la demanda interna; esto es algo que ha continuado sucediendo hasta la actualidad. Tras las fluctuaciones en la producción entre finales de los años 70 y principios de la década de 1990, desde 1992 (23.652.213 t) se registró una fuerte tendencia al alza que ha marcado los primeros años del siglo XXI. De esta forma se alcanzaron máximos históricos de producción de cemento en 2006, con 54.000.000 t, y en 2007, con 54.500.000 t, comenzando a partir de 2008 (42.100.000 t) un acusado descenso, enmarcado en el actual contexto económico nacional e internacional. En 2011 la producción fue de 22.200.000 t, cifra que se había alcanzado ya por primera vez en 1974.

Las materias primas necesarias para la producción de cemento, principalmente calizas y margas, son relativamente abundantes y de fácil acceso en la mayor parte de la península ibérica, por lo que su disponibilidad no ha supuesto, históricamente, un condicionante para la localización de las fábricas. En cambio, sí ha sido mucho más determinante el coste del

transporte del producto. Dado que el coste por unidad de masa del cemento es relativamente bajo (entre 80 y 150 €/t en 2012, según el tipo de cemento, según el Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Guadalajara, COAATG (2012)), el transporte por carretera supone una parte importante del precio final del producto, y no suele ser rentable efectuarlo a distancias superiores a los 200 km (Rosado, 1997; Canales et al., 2004). Para efectuar exportaciones o grandes expediciones, la vía marítima es la preferida. Por ello, ya desde sus inicios, las fábricas de cemento españolas se situaron en el entorno de los principales centros de consumo, en grandes ciudades y zonas industriales y, preferentemente, en la costa.

La naturaleza del proceso y de las instalaciones necesarias para llevarlo a cabo llevan a que el sector cementero sea muy intensivo en capital. Según Canales et al. (2004), la inversión necesaria para la construcción de una fábrica equivale aproximadamente a la facturación de 3 años, lo que supone una importante barrera de entrada para nuevos competidores. Otras características del sector son su elevada concentración económica, definida por el número de empresas que componen una industria y la distribución de sus tamaños, y una importante integración vertical, tanto aguas arriba (canteras y áridos) como aguas abajo (hormigones, morteros, prefabricados, etc.) (Cajamar, 2005). Las ventas de cemento se realizan principalmente por 4 canales: empresas hormigoneras, empresas de prefabricados, empresas constructoras como cliente directo, y almacenistas intermedios. En 2011, según OFICEMEN (2011), más de la mitad de las ventas fueron a empresas hormigoneras. La expedición se realiza a granel, sobre todo para hormigones y prefabricados, o en sacos, que es el formato mayoritario para las ventas a almacenistas intermedios.

A nivel empresarial, y como se ha indicado anteriormente, algunas firmas todavía existentes o que existían hasta hace pocos años nacieron con la propia industria española del cemento. Es el caso de Sociedad Anónima Tudela-Veguín (Oviedo, 1898), Hijos de José María Rezola (Guipúzcoa, 1901), Compañía General de Asfaltos y Portland Asland (Barcelona, 1904), Cementos Portland S.A. (Navarra, 1905), Sociedad Financiera y Minera (Málaga, 1921), Cementos Cosmos S.A. (León, 1924), Portland Valderribas C.M.A. (Madrid, 1925), entre otros. A lo largo del más de un siglo de historia, han sido habituales las operaciones de absorción e integración de pequeñas compañías, conformando grupos empresariales con varias fábricas. A finales de la década de 1980 comenzaron a introducirse en el mercado español, por la vía de la adquisición de instalaciones existentes, grandes grupos cementeros multinacionales. En 2010 operaron en España 35 fábricas integrales, de las cuales 8 pertenecían a Cementos Portland Valderribas, 7 a Cemex España, 5 a Holcim, 4 a Cimpor, 3 a Italcementi, 3 a Lafarge-Asland y 3 a Tudela-Vegín. Cementos Balboa y Cementos Molíns poseen una fábrica cada una. En 2003, los 4 primeros operadores aglutinaron más del 60% del mercado, lo que refrenda la característica concentración del sector (Cajamar, 2005). A nivel mundial los principales productores son Lafarge, Holcim, Cemex, Heidelberg Cement e Italcementi (Schorcht et al., 2013).

En 2010, las 35 plantas españolas en funcionamiento contaban con un total de 57 hornos de clinker. De ellos 54 eran de vía seca. A nivel europeo, en 2008 existían 268 plantas integrales en la UE, el 90% de vía seca. La tendencia de las instalaciones de vía húmeda, semihúmeda y semiseca es su conversión a vía seca una vez que tenga lugar su próxima renovación (Schorcht et al., 2013). Según Canales et al. (2004), la mejor tecnología disponible en la actualidad, para el caso general, es un horno de clinker rotatorio dotado de precalentador de ciclones multietapa y precalcinador, con un consumo energético aproximado entre 2,9 y 3,2 GJ por tonelada de clinker. La capacidad típica actual de las plantas europeas es de 3.000 toneladas / día (del orden de 1.000.000 t/año). En España existe todavía un número considerable de instalaciones de menor capacidad. Durante la última década se han registrado fuertes inversiones en las plantas existentes, encaminadas a incrementar la capacidad de producción y mejorar el desempeño ambiental de las

instalaciones. Al margen de las operaciones de compra por parte de los grandes grupos para incrementar sus cuotas de mercado, también ha sido característico, durante los años de incremento de la demanda, la entrada de nuevos competidores con instalaciones de ciclo no completo, con plantas de molienda que producen cemento a partir de clinker importado (Cajamar, 2005). Este tipo de plantas permiten superar una de las principales barreras de acceso del sector, que son los costes de instalación inicial, como se indicó anteriormente. En 2010 existían al menos 10 plantas de este tipo en España y 90 en toda la UE. La mayor parte de las importaciones provienen de Turquía, Europa del Este y Asia.

2. Objetivos

La determinación del perfil energético y de emisiones de gases de efecto invernadero permite caracterizar el impacto ambiental de la industria cementera, que es responsable de una parte muy importante de los impactos globales asociados al hormigón.

Los aspectos ambientales de la producción de cemento que se indican anteriormente han sido tratados ya en diversas publicaciones, si bien de distintos modos. Se pueden encontrar datos de este tipo en inventarios ambientales que incluyen múltiples materiales de construcción, como Alcorn (2003), referido a Nueva Zelanda, o Hammond y Jones (2011), elaborado en el Reino Unido. Flower y Sanjayan (2007) se centran en estudiar las emisiones derivadas del sector Australiano del hormigón, donde la mayor importancia porcentual corresponde al cemento. Nisbet et al. (2010) realizan un completo estudio publicado por la norteamericana Portland Cement Association. La literatura referida al perfil ambiental del sector del cemento en España es menos abundante, a pesar de ser un país con un importante número de instalaciones en funcionamiento. Cagiao (2011) ha realizado un completo análisis de la huella de carbono, un indicador más completo y de mayor complejidad que los tratados en este trabajo, restringiéndose a dos plantas de producción concretas. Cardim (2001) incluye dentro de su Tesis Doctoral un análisis muy detallado del impacto ambiental de una planta cementera ubicada en Cataluña. Este mismo autor participa en la publicación de Josa et al. (2007), en la que se estudian diferentes inventarios ambientales referidos a cementos europeos y que se incluyen en bases de datos comerciales.

El objeto de este trabajo es analizar las características ambientales de los cementos producidos en España, empleando toda la información pública al respecto disponible en el momento de su elaboración, de cara a servir como inventario ambiental en posteriores trabajos de Análisis de Ciclo de Vida y de desarrollo de nuevos modelos de estudio de la sostenibilidad estructural. Ha sido publicado ya un primer trabajo en este sentido (Mel et al., 2013), para el que se empleó información extraída de las Declaraciones Ambientales de una decena de fábricas españolas que están certificadas según el reglamento EMAS (Unión Europea, 2009). Esta información fue completada mediante la consulta de numerosas fuentes bibliográficas. A continuación se ofrece un análisis más detallado, en este caso empleando datos de la totalidad de las plantas de producción de clinker en operación en nuestro país en la primavera de 2013. Esta información, similar a la aportada en las Declaraciones Ambientales consultadas anteriormente, procede de las memorias estadísticas anuales de OFICEMEN, organización patronal que aglutina a la mayoría de los productores de cemento y clinker españoles (OFICEMEN, 2012).

Esta comunicación se centra en el consumo de energía y la emisión de CO₂ en las diferentes etapas del proceso, como primera parte de un trabajo en curso que supone realizar modelos de evaluación de la sostenibilidad que tengan también en cuenta otros aspectos medioambientales, económicos y sociales.

3. Metodología

3.1. Planteamiento General

La fabricación de cemento incluye varios procesos, tanto internos como externos a la planta de producción, que precisan ser analizados para poder conocer el consumo energético y la emisión de CO₂ por unidad de masa de producto final. El cálculo de ambos parámetros y las hipótesis asumidas para el mismo serán detallados por separado. Sin embargo, el esquema general es el mismo y se presenta a continuación. Para simplificar la redacción de los epígrafes siguientes, se ha tomado el convenio de designar por “E” a los términos relacionados con consumos energéticos y por “G” a los relativos a emisiones.

En particular, los aspectos que se analizarán en el presente trabajo son:

1. El empleo de combustibles en el interior de las plantas de producción, principalmente en los hornos de calcinación de clinker.
2. El empleo de energía eléctrica en las instalaciones de producción.
3. La extracción de materias primas de canteras.
4. El transporte de materias primas y combustibles hasta la fábrica.
5. El ciclo de vida de la propia planta de producción.

Cuando se realiza un análisis de ciclo de vida por procesos (Goggins et al., 2010), el alcance del estudio se extiende “aguas arriba”, buscando las raíces de cada proceso estudiado. Cuando la significatividad de los resultados que se obtendrían al incrementar un escalón más el estudio resulta poco relevante dentro del conjunto, se entiende que se pueden omitir los órdenes superiores con un “error de truncamiento” aceptable. En este caso se introducen, como elementos de orden superior al primero, el estudio de los procesos de producción de energía eléctrica y de combustibles fósiles.

Conviene, a la hora de analizar los procesos, diferenciar la producción de clinker de la de cemento. La producción de clinker emplea la mayor parte de las materias primas totales, tanto naturales como alternativas, y la práctica totalidad de los combustibles. El clinker producido pasa a la línea de producción de cemento, donde es molido junto con otras materias primas y almacenado para su expedición. Raras veces las fábricas funcionan de modo aislado, siendo frecuentes los intercambios de clinker entre diferentes unidades de producción. Así, una planta puede exportar parte de su clinker y fabricar cemento con el resto, o al contrario, importar clinker procedente del exterior y fabricar más cemento del que permitiría su producción primaria. Vistos los resúmenes estadísticos, es habitual que las fábricas alternen dentro de un mismo ejercicio importaciones y exportaciones, en función de su ritmo de producción y las demandas del mercado. La figura 1 representa un diagrama de flujo simplificado del proceso a estudiar, indicando las entradas, salidas y fronteras del mismo.

3.2. Formulación para el Cálculo Energético

La energía consumida en la producción de clinker se compone de la que supone la utilización de combustibles diversos, de la energía eléctrica usada en el proceso, de la necesaria para la extracción de materias primas, la precisada para el transporte de las mismas, y la que supone el ciclo de vida de las instalaciones productivas:

$$E_{clinker} = E_{combustibles} + E_{electricidad\ ck} + E_{extracción\ MMPP\ ck} + E_{transportes\ ck} + E_{CVplanta\ ck} \quad (1)$$

El primer sumando de la expresión (1) contempla la energía asociada al empleo de combustibles, tanto fósiles como alternativos:

$$E_{combustibles} = \sum_i C_i \cdot VCN_i \cdot FEP_{C_i} \quad (2)$$

Donde C_i es la cantidad del combustible i expresada en toneladas, VCN_i el valor calorífico neto en MJ/t del combustible i , y FEP_{C_i} el factor de energía primaria de dicho combustible i .

Para los combustibles tradicionales se han tomado los VCN aportados por la Comisión Europea (Unión Europea, 2007). Ante el empleo de combustibles alternativos, generalmente constituidos por residuos de otros procesos o actividades, resulta de mayor dificultad conocer, sin acceso a los análisis efectuados por cada planta, el poder energético de los mismos. Se toman como referencia los PCI indicados en Carrasco et al. (2003) para biomásas diferentes de la madera, plásticos, lodos industriales (asimilados a “lodos y alquitranes ácidos – destilación del petróleo”), textiles y RSU. En los restantes casos se emplean valores indicados por la Unión Europea (2007), asimilando dentro de la categoría de “aceites usados” a los disolventes, pinturas, aguarrás y alcohol industrial, y a los “residuos de hidrocarburos”, como los alquitranes.

El factor de energía primaria del combustible, FEP_c , tiene en cuenta el coste energético de la producción de combustibles de origen fósil. Este coste energético incluye su extracción y procesado industrial, pero no el transporte final hasta la planta cementera, contemplado dentro de los procesos de transporte. Se emplea el valor $FEP_c = 1,085$ propuesto por Furuholt (1995). Para los combustibles alternativos, dada su naturaleza de residuos o subproductos, no tiene sentido considerar la energía invertida en su producción ($FEP_c = 1$).

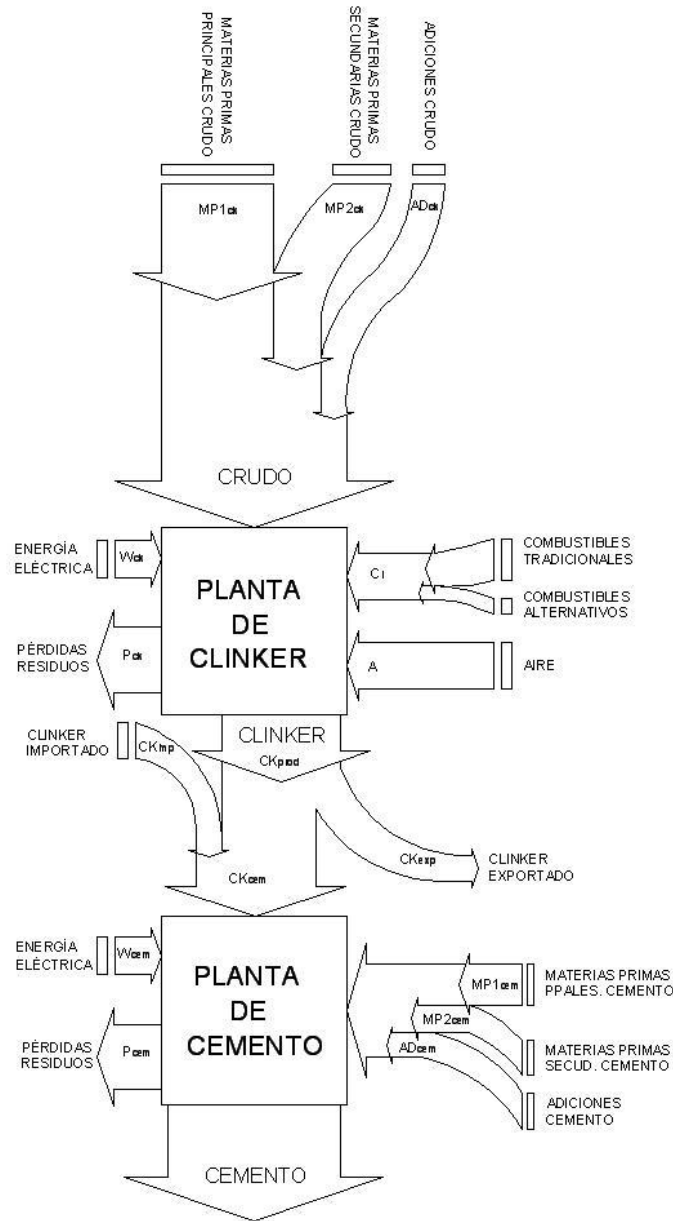
El término correspondiente a la energía eléctrica de la expresión (1) es de sencilla obtención, multiplicando el consumo eléctrico W_{ck} de la planta de clinker durante el periodo considerado (todos los cálculos se han realizado sobre una base anual) por el factor de energía primaria asociado a la electricidad, FEP_e :

$$E_{electricidad\ ck} = W_{ck} \cdot FEP_e \quad (3)$$

Los datos ofrecidos por OFICEMEN no desagregan el consumo eléctrico de las instalaciones de clinker y cemento, sino que ofrecen un único dato. Basándose en la información obtenida a partir de dos plantas que sí ofrecen ambos datos por separado, se puede asumir la hipótesis de que dicho consumo se reparte al 50% entre ambas instalaciones. De esta forma, $W_{ck} = \frac{1}{2} \cdot W$, siendo W el consumo eléctrico total de la planta industrial.

El cálculo de FEP_e se detalla en Mel et al. (2013). Este factor marca la cantidad de energía primaria asociada a una unidad de medida de energía eléctrica producida, teniendo en cuenta los consumos energéticos y de ciclo de vida de las unidades de producción, así como sus rendimientos. Debe ser determinado para cada año, debido a que circunstancias económicas, tecnológicas o climatológicas pueden causar variaciones en el mismo. En España la tendencia sostenida durante los últimos años es de una disminución continuada, debido a la mejora tecnológica (sustitución de centrales de carbón por plantas de ciclo combinado) y al incremento de generación mediante energías renovables.

Figura 1: Diagrama de flujo del proceso de producción de cemento en una planta integral.



Pasemos ahora al término correspondiente a la energía eléctrica necesaria para la extracción de materias primas, incluido en la expresión (1). La fórmula usada aquí es:

$$E_{extracciónMMPP\ ck} = \sum_i M_{1i} \cdot FE_{extr} \quad (4)$$

Las materias primas principales para la producción de clinker (calizas y margas) son extraídas de cantera, en general, mediante el empleo de maquinaria diesel y explosivos. Se ha empleado la información procedente de las Declaraciones Ambientales para estimar la contribución energética de los explosivos, y se ha tratado como un transporte el funcionamiento de la maquinaria con motor de combustión. Con ello se ha calculado el factor de energía en extracción, FE_{extr} .

Por su parte, en la expresión (4) M_{1i} representa la cantidad de cada materia prima extraída de cantera, de las denominadas materias primas minerales o principales. Cuando las

canteras se encuentran muy próximas a la fábrica, cosa habitual que no siempre ocurre, el transporte puede efectuarse mediante cintas transportadoras accionadas por electricidad. En este caso, el consumo eléctrico se encuentra ya contemplado dentro de la expresión (3).

Para valorar el sumando correspondiente a la energía usada en los procesos de transporte incluido en la expresión (1), resulta necesario tener en cuenta que existen diferentes tipos de materiales que deben ser transportados, y que las distancias de transporte son diferentes, dependiendo del material y de su origen. Los medios de transporte empleados pueden ser los relativos a la carretera, al ferrocarril, o al transporte marítimo. En 2005 se transportaron por carretera el 85% de las toneladas-km movidas en España (Pérez y Monzón, 2008). Por ello el caso más desfavorable que se contempla en este estudio es que todos los transportes se efectúen por carretera mediante camiones. Obviamente, en algunos casos de este sector se emplean los otros medios citados, más eficientes. El término energético asociado al transporte en la expresión (1) se compone, por tanto, de varios sumandos:

$$E_{transportes\ ck} = E_{tMMPP1\ ck} + E_{tMMPP2\ ck} + E_{tad\ ck} + E_{tcomb} \quad (5)$$

$E_{tMMPP1ck}$ y $E_{tMMPP2ck}$ representan, respectivamente, el transporte de materias primas principales (procedentes de cantera) y secundarias empleadas en el crudo. E_{tadck} corresponde al transporte de adiciones para el crudo y E_{tcomb} al transporte de combustibles. Todos los términos se determinan a partir de la expresión genérica (6):

$$E_{tx} = \sum_i M_{xi} \cdot D_{xi} \cdot IE_x \quad (6)$$

Donde E_{tx} es la energía asociada al transporte de cada uno de los términos que aparecen en (5), M_{xi} la cantidad de cada material transportado dentro de cada categoría (por ejemplo, dentro del término de transporte de adiciones se pueden transportar cenizas volantes y humo de sílice), D_{xi} la distancia a la que se realiza cada transporte, e IE_x la intensidad energética del medio de transporte empleado.

Las materias primas principales son, como se ha indicado, las calizas y margas procedentes de cantera. Lo más habitual en el sector es que las canteras se encuentren próximas a la fábrica o incluso formando parte del mismo complejo; no obstante existen casos en los que las canteras están situadas a cierta distancia. Existen también transportes de material dentro de las propias fábricas que pueden no estar contemplados en las estadísticas ofrecidas por la patronal del sector, ya que son efectuadas por empresas subcontratistas con sus propios medios. Para tener en cuenta en el cálculo las circunstancias anteriores, se ha optado por asignar una pequeña distancia de transporte interno a todo el material procedente de cantera en todas las fábricas.

Las materias primas secundarias (correctores, adiciones, yeso, etc.) proceden del exterior de las plantas, siendo lo habitual que la empresa utilice aquellas a las que tiene un acceso más económico, por proximidad o por su naturaleza. En algunos casos, como por ejemplo en el yeso, que se produce en un número reducido de instalaciones, las distancias de transporte pueden ser considerables. Para este análisis se ha tomado como distancia media de transporte de las materias primas secundarias 100 km. Para las adiciones es razonable suponer distancias medias de transporte mayores, en este caso de 300 km, debido a que únicamente se producen en determinadas instalaciones; así, por ejemplo, en España sólo se produce humo de sílice en A Coruña y escorias de alto horno en Asturias, y las cenizas volantes proceden de las centrales térmicas de carbón.

Los combustibles tradicionales proceden de las refinerías (coque de petróleo, fuelóleo, gasóleo), salvo la hulla y el gas natural, la primera procedente de cuencas mineras nacionales o extranjeras, y el segundo transportado por tubería desde las plantas regasificadoras. A la vista de los datos estadísticos disponibles, la mayoría del coque y de la

hulla son importados y transportados por vía marítima; los combustibles de origen nacional proceden de alguna de las nueve refinerías existentes en España. Para el transporte de estos productos por carretera se ha considerado una distancia media de 300 km. Para los combustibles de importación se ha supuesto una distancia marítima media de 5.000 km. Para los combustibles alternativos se ha tomado 100 km como distancia media, ya que suelen proceder de distancias cortas o medias, si bien es verdad que para algunos, como los neumáticos fuera de uso (NFUs), puede ser rentable su transporte a distancias mayores.

La intensidad energética IE_x asociada al transporte por carretera procede de la referencia Pérez y Monzón (2008), incrementada en un 3%, de acuerdo con lo propuesto por Eriksson et al. (1996), para incluir el impacto del ciclo de vida de los vehículos. Se toma un porcentaje de recursos invertidos en la fabricación de los camiones inferior al de los turismos debido a que los segundos recorren una distancia mucho mayor que los primeros a lo largo de su vida útil. En Pérez y Monzón (2008) se indica también la intensidad energética del transporte marítimo internacional, que se ha decidido incrementar en un 1%, a falta de otros datos, para tener en cuenta el ciclo de vida de los buques empleados.

Pasemos ahora al último sumando de la fórmula (1). La energía asociada al ciclo de vida de la planta industrial, cantera e instalaciones auxiliares (construcción, mantenimiento y desmantelamiento de las mismas, principalmente) se ha estimado en un 5% de la energía consumida, a falta de datos concretos que permitan una aproximación más fidedigna. En Rosado (1997) se indica que el coste aproximado anual de los desgastes en plantas cementeras es del orden del 5% de la facturación, lo que si bien no tiene directamente que ver con los aspectos energéticos del ciclo de vida, sí confirma el orden de magnitud supuesto. Por tanto, el último sumando de la expresión (1) queda:

$$E_{CVplanta\ ck} = 0,05 \cdot (E_{combustibles} + E_{electricidad\ ck} + E_{extracción\ MMPP\ ck}) \quad (7)$$

Hasta aquí todo lo relativo a la manera de calcular la expresión (1). A partir de ella, la energía específica del clinker, E_{eck} , se obtiene del cociente entre $E_{clinker}$, calculada mediante la fórmula (1), y la producción total de clinker de la planta considerada:

$$E_{eck} = E_{clinker} / Ck_{producido} \quad (8)$$

Para determinar la energía primaria de producción del cemento es necesario tener en cuenta el balance de clinker de la fábrica, según el cual se emplearán en la producción de cemento (Ck_{cem}) todo el clinker producido y no exportado y también el clinker importado desde el exterior:

$$Ck_{cem} = (Ck_{producido} - Ck_{exportado}) + Ck_{importado} \quad (9)$$

Una vez tratado lo relativo al clinker, hay que pasar al cemento. Los sumandos que componen la expresión de la energía del cemento son las contribuciones energéticas de la extracción y transporte de materias primas de cemento ($E_{transportes\ cem}$, $E_{extracción\ MMPP\ cem}$), la parte correspondiente de la energía eléctrica ($E_{electricidad\ cem}$), la asignada al ciclo de vida de la planta de cemento ($E_{CV\ cem}$) y, sobre todo, la energía que viene incorporada al clinker ($E_{Ck\ cem}$):

$$E_{cemento} = E_{Ck\ cem} + E_{electricidad\ cem} + E_{extracción\ MMPP\ cem} + E_{transportes\ cem} + E_{CVplanta\ cem} \quad (10)$$

Los términos relativos a electricidad, extracción de materias primas, transportes y ciclo de vida son análogos a los definidos para la producción de clinker. La energía correspondiente al clinker se valora de forma diferente según se trate del producido en la propia planta (para el que se emplea la energía específica calculada mediante la fórmula (8)) o del clinker importado. En este último caso, debe señalarse que se considera un valor de energía específica $E_{eck\ importado}$ de 6 GJ/t, más alto que el obtenido en el presente análisis, al

proceder, en muchos casos, de terceros países. También se incluye, dentro del término de transportes, la energía correspondiente a un viaje por mar de 5.000 km de este clinker importado. Con ello, la fórmula usada para la energía incorporada al clinker queda:

$$E_{Ck\text{ cem}} = (Ck_{\text{producido}} - Ck_{\text{exportado}}) \cdot E_{eck} + Ck_{\text{importado}} \cdot E_{eck\text{ importado}} \quad (11)$$

Siguiendo la formulación anterior, en una base de cálculo anual, se obtiene la energía primaria acumulada en todo el proceso a lo largo del año. Dividiendo esta energía por la producción total de cemento se obtiene la energía específica del cemento.

$$E_{ecem} = E_{\text{cemento}} / Cem_{\text{total}} \quad (12)$$

3.3. Formulación para el Cálculo de las Emisiones de CO₂

La determinación de las emisiones de CO₂ que corresponden a la fabricación de clinker y cemento se lleva a cabo de un modo análogo al ya seguido en 3.2 para el estudio del consumo energético. La principal particularidad es la aparición de un nuevo término, en este caso debido a la descarbonatación de las materias primas durante el proceso de clinkerización, según la reacción $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$. La fórmula usada para las emisiones de CO₂ por causa del clinker es:

$$G_{clinker} = G_{\text{descarbonatación}} + G_{\text{combustible}} + G_{\text{electricidad ck}} + G_{\text{extracciónMMPP ck}} + G_{\text{transporte ck}} + G_{CV\text{planta ck}} \quad (13)$$

Las emisiones debidas a la descarbonatación y al consumo de combustibles componen lo que se denominan "emisiones directas" (G_{directas}). De acuerdo con la Ley 1/2005 (Jefatura del Estado, 2005), las empresas que realicen actividades incluidas dentro de su ámbito de aplicación (como es la fabricación de clinker) están obligadas a registrar sus emisiones directas y comunicarlas a las autoridades ambientales. Anualmente, el Ministerio de Medio Ambiente publica la información recopilada de todos los productores de emisiones, (Ministerio de Medio Ambiente, 2013; Registro Estatal de Fuentes y Emisiones Contaminantes, 2012).

Por su parte, las emisiones debidas al uso de combustibles pueden determinarse de una forma análoga a su consumo energético, en función de la cantidad consumida de cada combustible (C_i), el factor de emisión de los mismos por unidad de masa (FG_{Ci}) y un coeficiente que tenga en cuenta las emisiones generadas durante la extracción y procesado de los combustibles (FG_{PCi}):

$$G_{\text{combustible}} = \sum_i C_i \cdot FG_{Ci} \cdot FG_{PCi} \quad (14)$$

FG_{PCi} toma un valor de 1,10 para los combustibles fósiles, según Furuholt (1995); su significado es que la producción de los combustibles conlleva aproximadamente un 10% de las emisiones que posteriormente se producirán en su combustión. Las emisiones directas informadas por las plantas no incluyen esta estimación, sino únicamente el factor de emisión del combustible. Teniendo esto en cuenta, la expresión (14) puede escribirse como:

$$G_{\text{combustible}} = \sum_i C_i \cdot FG_{Ci} + \sum_i C_i \cdot FG_{Ci} \cdot (FG_{PCi} - 1) = G_{\text{comb.directas}} + G_{\text{producción comb.}} \quad (15)$$

A partir de (15) se puede definir la expresión (16), en la se estiman las emisiones debidas a la descarbonatación en función de las emisiones directas registradas por la planta, y de las emisiones directas del combustible:

$$G_{\text{descarbonatación}} = G_{\text{directas}} - G_{\text{comb.directas}} \quad (16)$$

Los factores de emisión FG_{Ci} empleados son los que propone la Unión Europea (2007), donde no todos los combustibles alternativos aparecen reflejados. Con respecto a los combustibles alternativos no contemplados en dicha publicación, se ha optado por

asimilarlos a las categorías más afines entre las existentes, y en caso de duda se ha optado por las emisiones más desfavorables (en general, las correspondientes a los NFUs). A los combustibles alternativos de origen biológico se les asigna un factor de emisión nulo, dado su carácter de recurso renovable.

Las emisiones debidas al consumo de energía eléctrica durante la producción de clinker se determinan a través del factor de emisión FG_e , cuya determinación se detalla en Mel et al. (2013). Al igual que el factor de energía primaria correspondiente, éste es variable según la combinación de tecnologías empleadas en la producción y debe determinarse para cada año. Ya se ha indicado anteriormente que se asume que el consumo total de energía eléctrica de una fábrica se reparte equitativamente entre las líneas de producción de clinker y de cemento. Con todo ello, la fórmula usada para las emisiones por consumo eléctrico es:

$$G_{\text{electricidad ck}} = W_{ck} \cdot FG_e \quad (17)$$

En cuanto a la extracción de materias primas, son válidos los mismos comentarios hechos para el consumo energético. Se toma de Flower y Sanjayan (2007) el factor de emisión del explosivo, FG_{extr} . La fórmula usada para las emisiones por extracción de materias primas es:

$$G_{\text{extracción MMPP ck}} = \sum_i M_{1i} \cdot FG_{extr} \quad (18)$$

Las emisiones debidas al transporte se determinan empleando las mismas hipótesis y distancias establecidas en 3.2. Los factores de emisión de gases IG_x asociados a los transportes se toman de Pérez y Monzón (2008), incrementados un 3%, según lo propuesto por Eriksson et al. (1996), para tener en cuenta las emisiones durante el ciclo de vida de los vehículos terrestres, aplicándose un incremento del 1% en el caso del transporte marítimo. Las fórmulas usadas para las emisiones debidas al transporte son:

$$G_{\text{transportes ck}} = G_{tMMPP1 ck} + G_{tMMPP2 ck} + G_{tad ck} + G_{tcomb} \quad (19)$$

$$G_{tx} = \sum_i M_{xi} \cdot D_{xi} \cdot IG_x \quad (20)$$

Las emisiones debidas al ciclo de vida de la línea de clinker se estiman de forma acorde a lo indicado en 3.2, como un 5% de las emisiones correspondientes a los procesos de combustión, electricidad y extracción de MMPP:

$$G_{CVplanta ck} = 0,05 \cdot (G_{\text{combustibles}} + G_{\text{electricidad ck}} + G_{\text{extracción MMPP ck}}) \quad (21)$$

Hasta aquí todo lo necesario para evaluar la fórmula (13). A partir de ella, la emisión específica de CO_2 para el clinker, G_{eck} , se obtiene del cociente entre $G_{clinker}$, calculado mediante dicha fórmula (13), y la producción total de clinker de la planta considerada:

$$G_{eck} = G_{clinker} / Ck_{total} \quad (22)$$

De forma análoga a lo ya dicho en 3.2, en la producción de cemento concurren las emisiones correspondientes al clinker producido y al importado desde el exterior, y las correspondientes a la energía eléctrica, transportes, extracción de materias primas y ciclo de vida de la línea de cemento:

$$G_{\text{cemento}} = G_{Ck\text{ cem}} + G_{\text{electricidad cem}} + G_{\text{extracción MMPP cem}} + G_{\text{transportes cem}} + G_{CVplanta\text{ cem}} \quad (23)$$

$$G_{Ck\text{ cem}} = (Ck_{\text{producido}} - Ck_{\text{exportado}}) \cdot G_{eck} + Ck_{\text{importado}} \cdot G_{eck\text{ importado}} \quad (24)$$

Dividiendo las emisiones anuales así obtenidas por la producción total de cemento, se obtiene la emisión de CO_2 específica del cemento, G_{ecem} :

$$G_{ecem} = G_{cemento} / Cem_{total} \quad (25)$$

3.4. Origen y Calidad de los Datos

Como se ha indicado, los datos estadísticos empleados para la elaboración de este trabajo proceden de las memorias estadísticas de OFICEMEN correspondientes a los años 2006 a 2010 (OFICEMEN, 2012). Cada una de estas memorias se estructura como un conjunto de tablas que recogen los datos ofrecidos por cada una de las instalaciones en lo referente a producción, ventas, importaciones, exportaciones, consumos energéticos, eléctricos y de materias primas (tanto naturales como alternativas). Las tablas incluyen la decena de instalaciones de molienda sin horno de clinker asociadas a OFICEMEN. En este trabajo no han sido tenidas en cuenta, ciñéndose al análisis de las plantas de ciclo integral.

Dada la gran cantidad de datos disponibles, y teniendo en cuenta que cada serie proviene de una fuente (fábrica) diferente, se ha decidido calcular dos ratios sencillas que sirvan como indicadores de la coherencia de una serie de datos, al menos de forma parcial. Para ello se recurre al balance de masas del horno de clinker y de la molienda de cemento.

Como se indica en Labahn y Kohlaas (1983), durante la calcinación de las materias primas éstas pierden sus componentes volátiles (aproximadamente el 44% de la caliza es CO_2 y el 7% de las arcillas es agua), dando lugar a que la cantidad de clinker obtenido sea inferior a la cantidad de materia prima cargada en el horno. En un caso típico, en el que únicamente se utilicen los dos materiales indicados anteriormente, estas pérdidas rondan el 35%, situándose la relación crudo/clinker entre 1,55 y 1,60. Por otra parte, durante la molienda del clinker siempre se añade una cierta cantidad de yeso (aporte de sulfato) para regular la velocidad de fraguado del cemento. De esta forma, la ratio clinker/cemento siempre es inferior a la unidad.

Determinar las relaciones crudo/clinker y clinker/cemento para cada fábrica y año es sencillo con los datos disponibles, y permite detectar posibles errores en la recopilación de datos o la falta de alguna variable importante no recogida explícitamente en las estadísticas, como podría ser el almacenamiento de productos intermedios. Relaciones crudo/clinker < 1 o relaciones clinker/cemento > 1 son incoherentes, y por lo tanto los datos correspondientes a la fábrica y año en que se detecta alguna de las dos circunstancias no son tenidos en cuenta a la hora de determinar los valores medios resultantes.

El caso más significativo es el de la planta de Aboño, propiedad de Tudela-Veguín, que en todos los años estudiados presenta una relación crudo/clinker siempre inferior a la unidad (comprendida entre 0,6 y 0,8). Como hipótesis, se plantea la posibilidad de que pueda tratarse de un error en la toma de datos, por ejemplo si alguna de las materias primas empleadas en la producción de clinker no aparece reflejada en las estadísticas. También la planta de Córdoba (grupo Cimpor) presenta relaciones crudo/clinker anómalas en 2006, 2007 y 2008. Las plantas de La Robla (Tudela-Veguín) y San Vicente del Raspeig (Cemex España) ofrecen relaciones clinker/cemento superiores a la unidad en 2009 y 2010, al igual que la de Carboneras (Holcim España) en 2008 y 2010. La fábrica de Niebla (Cimpor) presenta el mismo problema en 2010 y una relación crudo/clinker extremadamente baja en 2006, mientras que las de Buñol (Cemex España), Lorca (Holcim España) y San Vicenc dels Horts (Cementos Molíns Industrial) tienen problemas en su relación clinker/cemento en 2010.

Se observa que las anomalías en la relación clinker/cemento aparecen a partir de 2008 (un caso) y se multiplican en 2010 (7 casos), lo que induce a pensar que se trate de un efecto indirecto de la situación por la que atraviesa el mercado; por ejemplo, que se trate de un incremento del almacenamiento de clinker.

4. Resultados

De la forma indicada en 3.2 y 3.3, se han calculado los consumos de energía primaria y las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la producción de clinker y cemento, por tonelada de material y para cada una de las fábricas estudiadas. En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos.

En la tabla 2 se presenta una recopilación de datos análogos, tomados de diferentes fuentes bibliográficas. Puede comprobarse que los resultados de este trabajo se encuentran dentro del rango de valores ofrecidos habitualmente por la bibliografía especializada. En particular, las referencias indicadas ofrecen unos valores medios de 4,798 GJ/t y 0,927 tCO₂/t para el cemento fabricado en Estados Unidos, y de 4,510 GJ/t y 0,740 tCO₂/t para el cemento producido en el Reino Unido.

Tabla 1. Resumen de resultados. Rango de valores y valores medios de consumo de energía primaria y emisión de CO₂ para el sector de fabricación de cemento en España en 2006-2010.

Producto	Energía (GJ/t)		Emisiones (tCO ₂ /t)	
	Rango	Media	Rango	Media
Clinker	4,018 – 6,812	4,974	0,872 – 1,219	0,979
Cemento	3,225 – 6,012	4,388	0,581 – 0,997	0,778

5. Conclusiones

A la vista de los resultados que se resumen en la Tabla 1, una primera conclusión puede ser la valoración del desempeño ambiental de la industria cementera española, a nivel global, por comparación con otros valores de referencia. Tomando como referencia dos publicaciones oficiales centradas en las Mejores Técnicas Disponibles (MTD), como son Schorcht et al. (2013), a nivel europeo, y Canales et al. (2004), a nivel nacional. Según estas referencias, el empleo de la mejor tecnología disponible permitiría alcanzar consumos térmicos en los hornos por debajo de 4,0 GJ por tonelada de clinker (entre 2,90 y 3,20 según Canales et al., y entre 3,00 y 4,00 según Schorcht et al.). En los años estudiados, los consumos de energía térmica por tonelada de clinker se mantienen, para el conjunto del sector en España, entre 3,90 y 4,10 GJ/t. Teniendo en cuenta que este dato agrega todas las plantas existentes, de diferentes capacidades, tecnologías y antigüedades, puede afirmarse que el sector español del cemento está en la línea de alcanzar las mayores eficiencias posibles en la actualidad. Previsiblemente, la evolución futura del sector ofrecerá indicadores todavía más cercanos a los valores asociados a las MTD, a medida que las instalaciones más antiguas o menos eficientes se vayan modernizando. Conclusiones muy similares se pueden obtener si se comparan las emisiones de dióxido de carbono por tonelada de cemento producido, que en España se encuentran entre 0,581 y 0,997 t (véase la Tabla 1), con los valores de referencia de Schorcht et al. (0,672 t) y Canales et al. (0,700 t).

Como desarrollo posterior, sería interesante continuar con el análisis realizado en años siguientes, tanto para observar la evolución del sector, como para evaluar la posible incidencia del contexto económico actual en el mismo.

Tabla 2. Valores medios de consumo energético y emisión de CO₂ en la producción de cemento y clinker.

Concepto	E (GJ/t)	G (tCO₂/t)	Referencia
Cemento producido en la UE por vía seca c/ precalentamiento multietapa (sólo energía térmica, valores por tonelada de clinker)	3,00 – 4,00	-	
Cemento producido en la UE por vía seca c/ precalentamiento ciclónico (sólo energía térmica, valores por tonelada de clinker)	3,10 – 4,20	-	
Cemento producido en la UE por vía semi-seca (sólo energía térmica, valores por tonelada de clinker)	3,30– 5,40	-	Schorcht et al. (2013)
Emisiones medias por tonelada de cemento producido en la UE	-	0,672	
Valores medios para el cemento producido en el Reino Unido	4,51	0,740	Hammond y Jones (2011)
CEM I producido en el Reino Unido (94% clinker)	5,50	0,950	
Valores medios para el cemento producido en Nueva Zelanda	6,20	0,994	
Cemento producido por vía seca en Nueva Zelanda	5,80	0,967	Alcorn (2003)
Cemento producido por vía húmeda en Nueva Zelanda	6,50	1,021	
Emisiones medias del cemento producido en Australia		0,700 – 1,000	Flower y Sanjayan (2007)
Cemento producido por vía seca en Estados Unidos	5,59	1,010	
Cemento producido por vía húmeda en Estados Unidos	6,40	1,100	
Cemento producido por vía seca c/ precalentador en Estados Unidos	4,36	0,852	Nisbet et al. (2010)
Cemento producido por vía seca c/ precalcinador en Estados Unidos	4,22	0,874	
Cemento medio producido en Estados Unidos	4,80	0,927	

Por plantas, los cálculos realizados muestran que existen ciertas diferencias entre unidades. La planta de Tudela-Veguín es la que presenta mayores valores de consumo energético y emisión de CO₂ por tonelada producida. Esta planta es la de menor capacidad de las que operan en este momento en nuestro país; únicamente cuenta con un horno para clinker blanco, con una capacidad máxima de 400 t/día. También la planta de Córdoba (Grupo Cimpor) muestra valores elevados, si bien esta planta es una de las que presentan también anomalías en la coherencia de sus datos estadísticos, y por ello puede no ser correcta su comparación. La planta de Yeles (Holcim España) tiene un tamaño medio (1900 t/día) y destaca en cuanto a lo elevado de sus emisiones.

Como se ha indicado anteriormente, el cálculo de dos ratios relacionadas con el balance de masas de las plantas arroja resultados incoherentes en algunos de los casos. Se ha realizado una consulta a OFICEMEN en este sentido, aunque todavía no se ha recibido respuesta.

En cambio, donde no aparecen apenas discrepancias es en las relaciones entre energía térmica y energía total y entre emisiones directas (debidas a los combustibles y a la descarbonatación) y emisiones totales, en ambos casos refiriéndose a la producción de clinker. Ambas ratios se sitúan en valores comprendidos entre 0,80 y 0,90, prácticamente sin excepción y con una desviación en general muy baja. De esta forma se confirma la gran importancia que tienen sobre el total los procesos térmicos en el horno de clinkerización, ya que se confirma que son responsables de más del 80% del consumo de energía y de las emisiones de CO₂.

Por último, se desea señalar que con los resultados obtenidos en este trabajo se cumple el objetivo de apoyar los futuros desarrollos, tanto por parte de los autores como de otros interesados, de disponer de un inventario ambiental de la producción de cemento actualizado y referenciado a nuestro país. Este inventario resultará de utilidad a la hora de plantear nuevos modelos de estudio de la sostenibilidad estructural, así como para la elaboración de Análisis de Ciclo de Vida de productos que incorporen el cemento entre sus componentes. Este objetivo ha sido, durante la realización del estudio, prioritario sobre la caracterización del desempeño ambiental de las fábricas de cemento españolas, el cual dependerá no sólo de los indicadores expuestos en esta comunicación, sino también de muchos otros parámetros.

Agradecimientos

Los trabajos reflejados en esta comunicación se enmarcan en el proyecto MIVES IV, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto código BIA2010-20789-C04-02)

6. Referencias bibliográficas

- Alcorn, A., (2003). Embodied energy and CO₂ coefficients for NZ building materials. Centre for Building Performance Research, Victoria University of Wellington.
- Asociación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN), (2006) Anuario 2006, www.oficemen.com accedido 10.11.2012.
- Asociación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN), (2011) Anuario 2011, www.oficemen.com accedido 10.11.2012.
- Asociación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN), (2012) Datos Estadísticos 2006-2010, www.oficemen.com accedido 10.11.2012.
- Cagiao, J., (2011), Huella Ecológica del Cemento. Fundación Ingeniería Civil de Galicia. ISBN: 978-84-615-0034-5.
- Cajamar, (2005) El sector del cemento en España, *Boletín Económico – Financiero Cajamar*, suplemento nº 22.

- Canales, C., Giménez, O., Avellaneda, A., Monfá, E., Silva, S., Mora, P., Romay, M., Serra, M., (2004), Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España en la fabricación de cemento. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. ISBN: 84-8320-264-6.
- Carrasco, F., García-Gardet, A., Cabrero, F., (2003). Valorización de residuos en la industria cementera. *Ingeniería Química*, vol. 398, págs. 134- 140. ISSN: 0210-2064.
- Cementos Pórtland Valderrivas, (2013), Declaraciones Ambientales de las fábricas de Lemona, Mataporquera, Monjos, Vallcarca, Hontoria y El Alto, años 2009 – 2011. www.valderrivas.es , accedido el 07.10.2013.
- Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnico e Ingenieros de la Edificación de Guadalajara (COATG), (2012) Base de Datos de la Construcción, Capítulo 1: Materiales Básicos.
- Eriksson, E., Blinge, M., Lovgren, G., (1996). Life cycle assessment of the road transport sector. *The Science of Total Environment*, nº 189/190, págs. 69-76, PII: S0084-9697(96)05192-3.
- Jefatura del Estado. Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. *Boletín Oficial del Estado*, 10 de marzo de 2005, núm. 59, págs. 8405-8420.
- Federación Interamericana del Cemento (FICEM), (2012) Informe Estadístico 2011.
- Flower, D., Sanjayan, J., (2007), Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. *International Journal on Life Cycle Assessment*, vol. 12, nº 5, págs. 282-288. DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2007.05.327>.
- Furuholt, E.,(1995), Life cycle assessment of gasoline and diesel. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 14, págs. 251-263. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/09213449\(95\)00020-J](http://dx.doi.org/10.1016/09213449(95)00020-J).
- Goggins, J., Keane, T., Kelly, A., (2010), The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland. *Energy and Buildings* vol. 42, págs.735-744. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.013> .
- Hammond, G., Jones, C., (2011). Inventory of Carbon and Energy (ICE). Version 2.0. Sustainable Energy Research Team, Dept. Of Mechanical Engineering, University of Bath, www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied .
- Josa, A., Aguado, A., Cardim, A., Byars, E., (2007). Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU. *Cement and Concrete Research*, vol. 37, págs. 781- 788. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.004>.
- Labanh, O., Kohlaas, B., (2013), Cement Engineer's Handbook, 4ª Edición en inglés, Bauverlag GMBH. ISBN: 3-7625-0975-1.
- Maxam, (2013). Hojas de datos de la familia de explosivos RIOGEL, tomadas de www.maxam.com, accedido 07.10.2013.
- Mel, J., Del Caño, A., De La Cruz, P., (2013). Análisis del consumo energético y de las emisiones de CO₂ en la construcción de estructuras de hormigón en España. *Dyna. Ingeniería e Industria*, vol. 88, nº 1, págs. 59- 67. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5078> .
- Ministerio de Medio Ambiente, (2013). Instalaciones afectadas por la Ley 1/2005. Informes de aplicación correspondientes a los años 2006 – 2010.
- Nisbet, M., VanGeem, M., Gadja, J., Marceau, M., (2000), Environmental Life Cycle Inventory of portland cement concrete. Portland Cement Association, PCA R&D Serial Nº 2137.
- Pérez, P., Monzón, A., (2008). Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión. *Observatorio Medioambiental* , nº 11, págs.127-147.
- Pueyo, J., (1996). ¿Cuándo ha sido un oligopolio la industria del cemento artificial? El caso español, 1908 – 1922. *Revista de Historia Industrial*, vol. 9, págs. 83- 116.
- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR-ES), (2012). www.prtr-es.es accedido 10.11.2012.

- Rosado, A., (1997), Tesis Doctoral: La organización industrial del sector cementero español (1942-1966). Universidad Complutense de Madrid.
- Schorcht, F., Kourt, I., Scalet, B., Roudier, S., Delgado, L., (2013), JRC Reference Reports: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, capítulo 1, págs. 1-169. Joint Research Centre, Institute for prospective technological studies, European Commission. ISBN: 978-92-79-32944-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.2788/12850> .
- Unión Europea. Decisión 2007/589/CE de la Comisión, de 18 de julio de 2007, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 31 de agosto de 2007, núm. 229, pp. 33-34.
- Unión Europea. Reglamento (CE) nº 1221/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de noviembre de 2009, relativo a la participación voluntaria de organizaciones en un sistema comunitario de gestión y auditoría ambientales (EMAS). *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 22 de diciembre de 2009, núm. 342, pp. 1-45.