

Análisis del consumo energético y de las emisiones de CO₂ en la construcción de estructuras de hormigón en España



José Mel-Fraga*
Alfredo del Caño-Gochi**
M. Pilar de la Cruz-López**

Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dra. Ingeniero Industrial

* MINISTERIO DE DEFENSA. Jefatura de Instalaciones Navales. Arsenal Militar de Ferrol. Carretera de Circunvalación, s/n - 15402 Ferrol. Tfno: +34 981 336413

** UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA. Escuela Politécnica Superior. Dpto. de Ingeniería Industrial. Campus de Esteiro. C/ Mendizábal, s/n 15403 Ferrol. Tfno: +34 981 337400. alfredo@udc.es

Recibido: 18/05/2012 • Aceptado: 08/10/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5078>

ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION AND CO₂ EMISSIONS IN THE CONSTRUCTION OF CONCRETE STRUCTURES IN SPAIN

ABSTRACT

• The Spanish Structural Concrete Code (EHE) establishes a pioneering method for assessing sustainability of this type of structures. The EHE model includes different evaluation data based on expert judgment. This paper presents an analysis of energy consumption and CO₂ emissions associated to the construction of concrete structures in Spain. It should be the first steps in suggesting potential improvements to the EHE model, related to the aspects covered here. The results obtained make it possible to identify the relative impact of the different materials and processes. They provide clear data that will be useful for contrasting the specific assessment criteria established in the EHE.

• **Keywords:** structural concrete, cement, clinker, steel, energy consumption, CO₂ emissions, Spain.

RESUMEN

La Instrucción española de hormigón estructural (EHE) establece un método de evaluación de la sostenibilidad de este tipo de estructuras, pionero internacionalmente. En él se han incluido diferentes valoraciones basadas en el juicio de expertos en la materia. Este artículo presenta un análisis del consumo energético y de las emisiones de CO₂ asociadas a la construcción de estructuras de hormigón, en el marco español. Con ello se pretende sentar bases para establecer posibles mejoras del modelo de la EHE, relacionadas con los aspectos aquí tratados. Los resultados obtenidos permiten identificar el impacto relativo de los diferentes materiales y procesos de fabricación y construcción, aportando datos claros que servirán para contrastar algunas de las valoraciones de la EHE.

Palabras clave: hormigón estructural, cemento, clinker, acero, consumo energético, emisiones CO₂, España.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MARCO GENERAL

El hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo. Su volumen de producción y el elevado consumo energético de algunos de sus componentes hacen que su impacto ambiental sea significativo. En otro orden de cosas, desde 2008 la *Instrucción española de hormigón estructural* (EHE) establece un método de evaluación de la sostenibilidad estructural, pionero internacionalmente (Anejo 13 de la EHE) [1]. En él se han establecido diferentes valoraciones basadas en el juicio de expertos en la materia. Con objeto de establecer posibles mejoras en él, resulta de interés saber si dicho método es acorde con determinadas realidades objetivas que no pudieron ser analizadas por el grupo de trabajo que redactó su articulado, por falta de tiempo y otros condicionantes que se dieron en aquel proyecto.

España contaba en 2009 con 35 plantas de producción de cemento en

funcionamiento (21.572.993 t de *clinker* en 2009) [2]. En 2005, antes de acusar los efectos del contexto económico negativo a nivel mundial, España fue el primer productor europeo de cemento y también el principal consumidor, seguido de Italia [3]. Varios autores analizaron inventarios ambientales de distintos cementos producidos en Europa [4] [5], procedentes de países con niveles de producción y consumo muy inferiores a los de España o Italia.

1.2. ASPECTOS ESENCIALES DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN

El ingrediente fundamental del hormigón es el cemento, resultado de un proceso industrial en el que se calcinan materias primas naturales, principalmente caliza, y también margas, arcillas y sílice. Sometiendo estos materiales a temperaturas del orden de 1.500 °C se consigue una reacción de descarbonatación, por la cual la caliza o carbonato cálcico (CaCO₃) se descompone en óxido de calcio (CaO, 56,03% en masa) y dióxido de carbono (CO₂, 43,97%). Se llama *clinker* al producto resultante de este proceso. El *clinker* se muele junto con otros productos, principalmente yeso, para obtener cemento. En función de su contenido en *clinker* y de la naturaleza de las adiciones que se añadan en la molienda, los cementos se clasifican en diferentes tipos, adecuados para diversas circunstancias [6] [7].

Resulta reseñable el consumo energético asociado al proceso de calcinación. Para elevar la temperatura de la mezcla mencionada se consumen grandes cantidades de combustibles fósiles (coque, hulla, fuelóleo, gas). Existen en la actualidad plantas en las que éstos se sustituyen por combustibles alternativos, como neumáticos fuera de uso (NFUs), aceites usados, biomasa, o residuos sólidos urbanos, entre otros. Durante la combustión se generan emisiones de CO₂, NO_x, SO_x y partículas en suspensión. Adicionalmente se consume energía eléctrica y gasóleo (con emisiones análogas) en equipos móviles y maquinaria de cantera, donde también tiene lugar una gran generación de polvo.

En este proceso las emisiones de CO₂ no provienen únicamente de reacciones de combustión, sino también de la descomposición de la materia prima. Teniendo en cuenta que el *clinker* contiene de media un 65% de CaO, proveniente en su totalidad de la calcinación, y que existe un pequeño porcentaje de pérdidas de polvo en el proceso, se puede obtener un factor de emisión por descarbonatación de 0,52 kg de CO₂ por kg de *clinker* producido [8].

Parte del *clinker* puede ser substituido por otras sustancias, llamadas adiciones. Esta substitución puede ser doblemente beneficiosa, ya que permite reducir la cantidad de material calcinado en el horno, y al mismo tiempo reciclar residuos de otros procesos industriales (sumidero ambiental). El lector puede obtener información adicional al respecto en las referencias [9] y [10].

En las plantas de preparación de hormigón el cemento se mezcla con áridos, agua y aditivos, en las proporciones especificadas en la dosificación correspondiente. Los componentes anteriores son transportados generalmente por carretera

hasta las plantas de hormigón. El material que es necesario trasladar a mayor distancia es el cemento, que se fabrica en instalaciones industriales de gran tamaño. Los áridos (finos y gruesos; arena, grava) suelen proceder de entornos más cercanos a la planta de hormigón. Desde las plantas de preparación de hormigón, éste se transporta en camiones cuba hasta el emplazamiento de la obra. Durante la ejecución de la estructura se emplean diferentes tipos de maquinaria, eléctrica o movida por motores de combustión. En la Fig.1 se presenta un diagrama de flujo del proceso.

1.3. OBJETIVOS

Este artículo presenta un análisis del consumo energético y de las emisiones de CO₂ asociadas a las actividades del sector español de hormigón estructural. Se trata de un primer paso en el establecimiento de posibles mejoras del modelo de la EHE, relacionadas con los aspectos aquí tratados.

2. METODOLOGÍA

2.1. MATERIAL Y MÉTODOS

Este estudio consta de dos partes diferenciadas. En la primera se estudia la producción de *clinker* y cemento en España, a partir de información publicada por los propios fabricantes. En la segunda se analizan varias dosificaciones de hormigón empleando los resultados de la primera parte, así como algunos datos procedentes de la bibliografía especializada.

Los datos de entrada provienen de fuentes solventes y son los de publicación más reciente, en el momento de escribir estas líneas. Para analizar el consumo de energía y las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de cemento se ha intentado localizar información relativa a las 35 plantas españolas, encontrando que únicamente 10 de ellas disponen de *Declaración Ambiental pública* según el reglamento EMAS [11] [12]. La información extraída de estas declaraciones, correspondientes a los años 2006-2009, es más precisa y representativa que la recogida en las Autorizaciones Ambientales Integradas. Se considera además que el tamaño de la muestra (sobre el 28% de la población) es suficiente.

Se ha realizado un análisis de la varianza [13] de los valores medios de consumo energético y de emisiones obtenidas de estas fuentes (existen un total de 31 registros por parámetro). Los valores de F calculados son 0,458 y 0,422 para energía y emisiones, respectivamente. El valor tabulado de la función F con 9 y 21 grados de libertad y un nivel de confianza de 0,05 es F_{0,95}=2,37. Como ambos valores de F calculados son menores que el F_{0,95} tabulado, se puede concluir que ninguna de las fábricas ha producido valores medios que difieran de forma significativa de los restantes.

Se utiliza también información procedente de instituciones públicas españolas [14] [15] [16]. Otros datos han sido tomados de la bibliografía especializada que se cita a lo largo de este texto.

35% [21]. La referencia [22] recoge las eficiencias de cuatro plantas estudiadas en Florida (EEUU), cuyo ratio está entre el 30,7% y el 39,5%. En EEUU la eficiencia media de las centrales norteamericanas convencionales es del 32% [23]. En España, analizando los datos de consumo y producción de 2010, recogidos en la referencia [15], para un conjunto de cinco plantas térmicas se obtienen eficiencias comprendidas entre el 31,5% y el 39%. La eficiencia de las centrales de fuelóleo es muy similar (36% según [24]; 39% analizando los datos de 2010 correspondientes a una planta española). La producción de energías no renovables acogidas al Régimen Especial de generación (plantas de cogeneración a partir de combustibles líquidos o gaseosos) se trata aquí con ratios similares a los de las centrales de fuelóleo, por ser el tipo más similar a éstas.

La eficiencia es más alta en las centrales de ciclo combinado, que habitualmente operan con gas natural como combustible. Suelen alcanzar cifras en torno al 50% de eficacia, como confirma el análisis de los datos recogidos en 2010 para seis centrales españolas de este tipo, con resultados entre el 48,4% y el 56,7% [25].

Existen además una serie de contribuciones de segundo o tercer orden, entre las que se incluye la extracción, preparación y transporte de los combustibles, las pérdidas de éstos, la construcción de las propias plantas y equipos, y el desmantelamiento de las mismas tras su vida útil, entre otros aspectos. Según las referencias [24], [25] y [26] la energía procedente del combustible supone el 91,9% del total en las centrales de fuelóleo y el 92,4% en las de ciclo combinado. Para el presente estudio se han considerado eficiencias del 33% para las centrales de carbón y fuelóleo y del 50% para las de ciclo combinado, y en los tres casos se toma la energía del combustible como un 90% de la energía total a lo largo del ciclo de vida.

En energía nuclear se estima un consumo energético fósil de entre 0,1 y 0,3 kWh térmicos por cada kWh eléctrico [27]. Además, y al igual que ocurre en las plantas de carbón, se considera un rendimiento termodinámico de las mismas del 33%. Sobre las fuentes de energía renovables se ha encontrado mayor divergencia entre los datos ofrecidos por la bibliografía, dada la gran variedad de instalaciones posibles.

Fuente energética	Eficacia (E final / E combustible)	Energía primaria
Carbón	0,33	1,11 x E combustible
Fuelóleo	0,33	
Ciclo Combinado	0,50	
Nuclear	0,33	1,20 x E final
Renovable	-	1,10 x E final

Tabla I: Hipótesis asumidas para el cálculo de la energía primaria en el sistema eléctrico

Año	2006	2007	2008	2009
E primaria / E final (kWh / kWh eléctrico)	2,83	2,90	2,46	2,28
E primaria / E final (MJ / kWh eléctrico)	10,18	10,45	8,85	8,20

Tabla II: Factores de energía primaria del sistema eléctrico español

Por analogía con las anteriores, se asume como hipótesis que el consumo energético medio, asociado al ciclo de vida de las mismas, sea de un 10% de la energía final producida.

Con las hipótesis anteriores, que se resumen en la Tabla I, se determina la energía primaria total consumida por el sistema eléctrico español en el periodo 2006-2009, dividiendo los resultados por la producción eléctrica total anual, para obtener los factores de energía primaria que se recogen en la Tabla II.

2.2.3. Transporte de materiales

Las fábricas de cemento estudiadas cuentan con canteras en sus inmediaciones, de las que se obtiene la principal porción de su materia prima. Es necesario transportar las materias primas secundarias (yeso, adiciones, correctores, residuos, etc.), así como los combustibles. Se ha tomado una distancia de cálculo de 50 km, al entender que lo habitual es emplear materiales y combustibles disponibles en el entorno de la planta. Esta suposición no es cierta en el caso de adiciones como el humo de sílice o las escorias de alto horno, que se producen únicamente en instalaciones industriales muy concretas. A efectos del transporte se ha tomado el valor de 1 MJ por tonelada y km recorrido [28], en transporte por carretera mediante camión convencional.

2.2.4. Otras contribuciones energéticas

No se ha tenido en cuenta la contribución energética del agua consumida, al resultar muy pequeña en comparación con las anteriores. Por otra parte, en algunas de las plantas estudiadas existe aporte exterior de clinker, al comprarse excedentes de otras instalaciones de producción. En estos casos se contabiliza la energía arrastrada por éste, como si hubiese sido producido en una planta de comportamiento análogo a las estudiadas, es decir, se reparte proporcionalmente entre las categorías anteriores, según el porcentaje correspondiente de energía térmica, eléctrica, etc.

2.3. EMISIONES DE CO₂ EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTO

Las emisiones directas, originadas por los combustibles y la descarbonatación, deben ser registradas y comunicadas a la Administración por parte de la instalación productora, al encontrarse los hornos de fabricación de *clinker* dentro del ámbito de aplicación de la Ley 1/2005 [14] [15]. Además de estas emisiones, existen otras asociadas a la producción de los combustibles, al consumo de energía eléctrica, al transporte de materias primas y combustibles, a la maquinaria diesel que opera en fábricas y canteras, y a otras aportaciones al proceso productivo.

2.3.1. Emisiones directas

La referencia [14] aporta datos que permiten calcular la relación entre las emisiones directas asociadas a las cementeras españolas,

y su producción. En 2009 dichas emisiones directas ascendieron a 18.219.905 t de CO₂, lo que supone un ratio de 0,84 kg CO₂ / kg clinker. El valor medio de este ratio para la decena de fábricas estudiadas en este trabajo es de 0,846 kg CO₂ / kg clinker, prácticamente idéntico al obtenido para el conjunto de la industria.

Las emisiones directas incorporan las debidas a la combustión, pero no las emisiones de mayor orden asociadas a la extracción y producción de los mismos. Éstas suelen ser estar en torno al 5-15% de las correspondientes a su combustión [19], y por ello se van a estimar aquí en un 10% de dichas cantidades. Los factores de emisión en combustión considerados son los indicados por las referencias [10] y [20].

2.3.2. Emisiones del sistema eléctrico

La referencia [14] permite acceder a los registros de emisiones de CO₂ de todas las centrales eléctricas de combustible fósil, cuyo sumatorio constituye el conjunto de emisiones directas del sistema eléctrico español. Deben de tenerse en cuenta, además, las emisiones de orden superior (obtención de combustibles, construcción de instalaciones, etc.), así como las correspondientes al ciclo de vida de las fuentes nucleares y renovables. Estas emisiones se valorarán de acuerdo a la bibliografía citada más adelante.

Para las plantas térmicas de carbón y fuelóleo se asume que las emisiones directas suponen un 90% de las emisiones totales, en consonancia con la literatura al respecto [21] [23] [24] [25] [30]. En centrales térmicas de ciclo combinado se considera que dichas emisiones directas son un 85% de las totales [25]. Para las energías renovables existen numerosos análisis de ciclo de vida que cuantifican sus emisiones, en función del tipo de instalación considerado. En este trabajo se han tomado valores medios de los rangos de emisiones dados por la referencia [30] para cada tecnología. La Tabla III incluye el conjunto de hipótesis que se acaban de mencionar. Dividiendo las emisiones totales, calculadas con dichas hipótesis, por la producción eléctrica total de cada año, se obtienen los factores de emisión del sistema eléctrico español que se recogen en la Tabla IV.

2.3.3. Emisiones asociadas al transporte y al empleo de maquinaria móvil

La extracción de piedra caliza en cantera se lleva a cabo, generalmente, mediante maquinaria diesel. La correspondiente emisión de CO₂ no está incluida en las emisiones directas. Para el gasóleo se ha tomado un factor de emisión de 0,003 tCO₂/L [31]. Las emisiones procedentes del transporte de materias primas secundarias y combustibles a la cementera se contabilizan mediante un factor de 0,2090 kg CO₂ / km x tonelada [32]. Se considera una distancia media de 50 km.

Fuente energética	Emisiones CO ₂ totales en ciclo de vida
Carbón	1,11 x Emisiones directas
Fuelóleo	
Ciclo Combinado	1,17 x Emisiones directas
Nuclear	6 - 24,2 g CO ₂ / kWh (media: 15,1 g CO ₂ / kWh)
Hidráulica	3,7 - 237 g CO ₂ / kWh (media: 120,35 g CO ₂ / kWh)
Eólica	9,7 - 123,7 g CO ₂ / kWh (media: 66,7 g CO ₂ / kWh)
Otras renovables	35 - 250 g CO ₂ / kWh (media: 142,5 g CO ₂ / kWh)

Tabla III: Hipótesis asumidas para el cálculo de las emisiones de CO₂ en el sistema eléctrico

Año	2006	2007	2008	2009
Emisiones (g CO ₂ / kWh eléctrico)	433	446	394	368

Tabla IV: Factores de emisión de CO₂ para el sistema eléctrico español

2.3.4. Otras emisiones consideradas

En el caso del clinker de procedencia ajena a la planta, sus emisiones se reparten entre las categorías anteriores de acuerdo con el porcentaje correspondiente a cada una, según los propios resultados de este estudio.

2.4. CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN LA CONSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL

Los epígrafes anteriores centran su estudio en la fabricación de cemento. Además de éste, forman parte del hormigón otros componentes como los áridos, los aditivos y adiciones, el agua y el acero, en este último caso, cuando se trata de hormigón armado o pretensado. Para evaluar la energía invertida en la construcción de una estructura de hormigón también hay que tener en cuenta la preparación del propio hormigón, la puesta en obra del mismo y los diferentes procesos de transporte que intervienen.

2.4.1. Dosificación y armado del hormigón

La proporción entre los componentes que forman el hormigón en masa depende de las propiedades o prestaciones que se deseen obtener de la mezcla. Para que este estudio sea suficientemente representativo, se han trabajado con veinte dosificaciones diferentes, resultado de considerar para cada resistencia característica (dentro del rango 20-25-30-35-40 N/mm²) cuatro posibles consistencias (seca, plástica, blanda y fluida), tomando para todas ellas un tamaño de árido máximo de 40 mm, áridos machacados y un cemento CEM-I de clase resistente 32,5. Además, se han analizado otras nueve dosificaciones empleadas por otros autores en estudios realizados en otros países, con objeto de poder comparar resultados. El armado también depende de las características de la estructura y de las solicitaciones para las que se haya proyectado. Para este estudio se ha considerado un valor de 50 kg por m³ de hormigón estructural. Este valor es suficientemente conservador para estructuras de hormigón armado y, por tanto, también debe serlo para las de hormigón pretensado,

en algunas de las cuales apenas hay más armaduras que las propias de pretensado, siendo estas muy reducidas en comparación con las que serían necesarias para soportar las mismas cargas con hormigón armado, cuando ello fuese factible.

2.4.2. Consumo asociado a componentes del hormigón distintos del cemento

Con respecto al consumo energético asociado a los áridos, la bibliografía recoge una gran variedad de ratios, en función del tipo y procedencia del árido. Se ha tomado un valor de 0,124 MJ/kg, propuesto por la referencia [33] para áridos en general, que resulta ser el más alto de los ofrecidos por las fuentes consultadas. Para las adiciones al hormigón (cenizas volantes, humo de sílice) no se considera más energía asociada que la correspondiente a su transporte hasta la planta de hormigón, incluida dentro del cálculo conjunto de transporte de materias primas, al no haberse encontrado datos relativos al consumo de los equipos empleados en la recolección y preparación de dichas adiciones. De todas formas esto es irrelevante, ya que la importancia porcentual de este aspecto es extremadamente reducida. Finalmente, para el agua se ha tomado también el ratio propuesto por la referencia [33]; se trata, de nuevo, de una contribución muy pequeña.

2.4.3. Consumo por causa de la producción de acero

La bibliografía recoge también diversos ratios para el factor energético del acero. Obviamente, existe una gran diferencia entre la energía consumida para fabricar acero virgen, mediante reducción del mineral en altos hornos, y la consumida para producir acero reciclado, fabricado por fusión de chatarra en horno eléctrico. Ello se debe a la diferente naturaleza de ambos procesos. En la bibliografía consultada se identifica al acero para armado como acero reciclado, suposición que se asume como válida también para nuestro país. Téngase en cuenta que en España la producción de acero virgen es muy reducida, en comparación con la de reciclaje, a diferencia de lo que sucede otros países. Se ha tomado un valor de 9,9 MJ/kg, propuesto por la referencia [34], como valor más conservador de los consultados para el acero reciclado. Como se verá, esto hace que la importancia del consumo del acero frente al cemento sea reducida, pero las cosas cambian drásticamente si se utiliza acero virgen.

2.4.4. Consumo relacionado con los procesos de transporte

Los transportes a considerar se pueden agrupar en tres clases: el necesario para llevar las materias primas a la planta de hormigón, el transporte de hormigón a obra y el traslado de armaduras a la misma. Aquí se emplea el mismo factor energético que en el transporte de materiales a la fábrica de cemento. La única excepción a ello es el transporte de hormigón preparado, ya que éste se realiza en un vehículo especial que, además de su función de transporte, debe mezclar continuamente el hormigón. Para este tipo de camiones se emplea un factor de 1,37 MJ por tonelada y km, propuesto por la referencia [33]. Finalmente, se han considerado como distancias más probables las de 100 km para el transporte de

cemento a la planta de hormigón, 50 km para el de áridos y adiciones, 35 km para el transporte a obra del hormigón preparado y 300 km para el envío de acero a la obra.

2.4.5. Consumo en la planta de procesado y en la puesta en obra

Tanto para el funcionamiento de la planta que dosifica y mezcla los distintos componentes como para la puesta en obra del hormigón (bombeo, vibrado, etc.), se han encontrado pocos datos en la bibliografía consultada. Operando a partir de los factores de emisiones propuestos por la referencia [31], adaptándolos a las características del sistema eléctrico español, se obtienen valores de energía de 9,99 MJ/m³ para la planta de hormigón preparado y 121,6 MJ/m³ para la puesta en obra.

2.5. EMISIONES DE CO₂ EN LA CONSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL

Siguiendo las mismas pautas que en el análisis de consumo energético, se ha analizado la emisión de CO₂ por parte de los diferentes hormigones considerados, antes mencionados.

En cuanto a las emisiones asociadas a componentes del hormigón distintos del cemento, los factores de emisión de árido fino y grueso que aquí se emplean proceden de re-elaborar los valores ofrecidos por la referencia [31], según el factor de emisión del sistema eléctrico español y, respectivamente, resultan unos valores de 0,009 y 0,0197 kgCO₂/kg. Basados también en dicha referencia, se usan factores de emisión de 0,027 kgCO₂/kg para las cenizas volantes y 0,143 kgCO₂/kg para las escorias granuladas de alto horno. Para el suministro de agua se emplea un valor de 0,0002 kgCO₂/kg, generado mediante re-elaboración del factor propuesto por la referencia [35]. Para el acero se toma un ratio de 0,474 kgCO₂/kg acero, en base a lo propuesto por la referencia [34].

Por su parte, el factor de emisión empleado en todos los transportes es el propuesto por la referencia [32], de 0,209 kgCO₂ por tonelada y km, siendo éste el más conservador de los consultados.

Tras ello, sólo falta considerar las emisiones correspondientes al procesado y puesta en obra del hormigón. Se han empleado en el cálculo los valores propuestos por la referencia [31], adaptando a nuestro país el correspondiente a la planta de hormigón preparado, debido a la alta influencia de la energía eléctrica en sus procesos. Respectivamente, se usan factores de 0,97 y 9,0 kgCO₂/m³ para el procesado y puesta en obra del hormigón.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En base a las hipótesis explicadas en el punto 2.1 de este artículo, y realizando los cálculos indicados en dicho apartado, se ha determinado el consumo energético anual para cada una de las diez plantas cementeras analizadas. Se disponía de diez conjuntos de datos, uno para cada planta analizada;

a su vez, cada conjunto está formado por datos de consumo correspondientes a tres años diferentes. A partir de dichos datos se ha calculado la media aritmética y desviación típica de cada parámetro estudiado. En la tabla V se recogen estos resultados. De la misma forma, en la Tabla VI se resumen los resultados obtenidos para las emisiones totales de CO₂ en la fabricación de cemento, calculados según se propone en el punto 2.2.

Por su parte, los resultados obtenidos tras realizar los cálculos que se resumen en el punto 2.3 se presentan en la Tabla VII. En ella se recogen los ratios de consumo energético para un hormigón de uso corriente (HA-25 P con 50 kg acero / m³), así como los valores medios correspondientes a las diferentes dosificaciones analizadas para hormigón en masa y para hormigón estructural. Finalmente, en la Tabla VIII se recogen los resultados de la realización de los cálculos planteados en el punto 2.4, relativos a las emisiones totales de CO₂ asociadas al hormigón, para esas mismas dosificaciones. En la Fig. 1 (diagrama de flujo) se incluyen los resultados para el hormigón HA-25 P estudiado.

A efectos ambientales, la fabricación de cemento es el proceso más relevante de entre los estudiados, con mucha diferencia. Supone más del 50% de la energía consumida y más del 70% de las emisiones de CO₂ correspondientes al conjunto del hormigón estructural.

Los resultados medios para la fabricación de cemento se

Parámetro	Valor medio	Desviación típica
Energía primaria / clinker (MJ/kg)	5,259	0,449
Energía primaria / cemento (MJ/kg)	3,986	0,431
Energía combustibles / Energía total	78,06%	1,99%
Energía electricidad / Energía total	21,52%	1,75%
Energía transporte / Energía total	0,25%	0,13%
Energía otros / Energía total	0,16%	0,32%

Tabla V: Resultados del análisis de energía primaria en la fabricación de cemento

Parámetro	Valor medio	Desviación típica
Emisiones / clinker (kgCO ₂ / kg)	0,991	0,080
Emisiones / cemento (kgCO ₂ / kg)	0,752	0,067
Emisiones directas / Emisiones totales	88,85%	0,93%
Emisiones electricidad / Emisiones totales	6,08%	0,59%
Emisiones transportes / Emisiones totales	0,37%	0,17%
Emisiones otros / Emisiones totales	4,70%	0,88%

Tabla VI: Resultados del análisis de emisiones de CO₂ en la fabricación de cemento

consideran coherentes, ya que se encuentran dentro del rango de valores aportados por la bibliografía [28] [29] [31] [33] [34] [36] [37] [38] [39], resultando unos valores de 3,986 MJ/kg para el consumo energético (valores habituales entre 3,30 a 6,20 MJ/kg) y de 0,752 kgCO₂/kg (rango entre 0,70 y 1,00 kgCO₂/kg). La mayor parte de la energía primaria consumida por el cemento, más del 70%, corresponde a los combustibles, seguidos de la energía eléctrica, que supone en torno al 20% del total. El porcentaje de emisiones de CO₂ directas se acerca al 90% de las totales.

Se estima que los datos obtenidos para la fabricación de cemento pueden hacerse extensivos al conjunto del sector,

Energía	HA-25 P / 50 kg acero m ³			Media hormigón en masa			Media hormigón estructural		
	MJ/m ³	MJ/kg	%	MJ/m ³	MJ/kg	%	MJ/m ³	MJ/kg	%
Cemento	1.262,09	0,505	52,76%	1.380,42	0,571	69,30%	1.380,42	0,560	55,17%
Acero	495	0,198	20,69%	0,00	0,000	0,00%	495	0,201	19,78%
Áridos	240,81	0,096	10,07%	233,52	0,097	11,72%	233,52	0,095	9,33%
Otros comp.	1,55	0,001	0,06%	1,48	0,001	0,07%	1,48	0,001	0,06%
Transporte	261,19	0,105	10,92%	244,95	0,101	12,30%	259,95	0,105	10,39%
Planta / obra	131,59	0,053	5,50%	131,59	0,054	6,61%	131,59	0,053	5,26%
TOTAL	2.392,22	0,957	100,00%	1.991,96	0,824	100,00%	2.501,96	1,014	100,00%

Tabla VII: Resultados del análisis de consumo energético en el hormigón

Emisiones CO ₂	HA-25 P / 50 kg acero m ³			Media hormigón en masa			Media hormigón estructural		
	kg/m ³	kg/kg	%	kg/m ³	kg/kg	%	kg/m ³	kg/kg	%
Cemento	238,83	0,095	67,66%	260,35	0,108	75,47%	260,35	0,106	70,03%
Acero	23,700	0,009	6,74%	0	0,000	0,00%	23,700	0,010	6,37%
Áridos	30,87	0,012	8,77%	29,79	0,012	8,64%	29,79	0,012	8,01%
Otros comp.	0,04	0,000	0,01%	0,18	0,000	0,05%	0,18	0,000	0,05%
Transporte	49,21	0,020	13,99%	44,65	0,018	12,94%	47,79	0,019	12,85%
Planta / obra	9,970	0,004	2,83%	9,970	0,004	2,89%	9,970	0,004	2,68%
TOTAL	351,83	0,141	100,00%	344,95	0,143	100,00%	371,79	0,151	100,00%

Tabla VIII: Resultados del análisis de emisiones de CO₂ asociadas al hormigón

en base a la amplitud de la muestra (10 fábricas, un 28% del total), al valor del ratio emisiones directas / producción de clinker, que prácticamente coincide con la media, y a que todas las plantas estudiadas utilizan el proceso de vía seca, al igual que el 93% de los hornos españoles [6].

Hasta aquí lo relativo al cemento. En cuanto al hormigón, los resultados medios para el hormigón en masa han sido de 0,824 MJ/kg y 0,143 kgCO₂/kg. Estos valores son conservadores, dado que son fruto de un promedio de los resultados obtenidos para diferentes dosificaciones de hormigón, mientras que no todas las dosificaciones son igualmente empleadas en la práctica habitual. La mayoría de los hormigones utilizados en edificación convencional tienen resistencias características de 25 a 30 MPa, mientras que sólo una pequeña parte se preparan para resistencias de 40 MPa o para valores superiores. Estos últimos hormigones, por un lado, suponen dosificaciones con mayores cantidades de cemento. Por otro, necesitan menos volumen de hormigón para unas mismas sollicitaciones. Finalmente, dichos ratios son coherentes con las referencias indicadas en el punto anterior, que suponen rangos de 0,7 a 1,4 MJ/kg para la energía y 0,08 a 0,20 kgCO₂/kg para las emisiones.

Las Tablas VII y VIII permiten identificar los aspectos de mayor relevancia a la hora de estudiar el comportamiento ambiental del hormigón. Como se ha indicado, la fabricación de cemento es el proceso de mayor impacto, seguido por la producción de acero para armaduras. Debe destacarse que modificando ligeramente la hipótesis de partida, que asume que el acero empleado en la fabricación de armaduras proviene íntegramente del reciclaje de chatarra, se pueden obtener variaciones muy importantes en los resultados finales del análisis. Esto se debe a que el acero producido en alto horno puede suponer el cuádruple de consumo de energía con respecto al acero procedente de chatarra, y sus emisiones de CO₂ pueden ser todavía mayores. El papel jugado por los áridos y por el transporte es de un rango inferior, como ocurre también con los procesos de procesado y puesta en obra del hormigón.

El análisis de la huella ecológica de una planta de producción de cemento realizado en [18] supone una mayor complejidad de aplicación que la relativa al método aquí aplicado. De dicho análisis se llega a una huella neta de 1.003.555,20 t CO₂ para una producción anual de 1.000.000 t de cemento, con lo que el ratio aproximado estaría en torno a 1 Kg CO₂/ Kg cemento, coherente y muy cercano al calculado en este estudio.

4. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Dicho todo lo anterior, los resultados aquí expuestos tienen consecuencias sobre determinados aspectos del Anejo 13 de la EHE-08. Dicho documento incluye un conjunto de 11 criterios medioambientales, cada uno de ellos formado, en general, por varias variables. A través de un sistema de ponderaciones y funciones de valor, el conjunto de alternati-

vas y soluciones seleccionadas durante el proyecto y ejecución de una estructura de hormigón se traduce en un índice numérico, que permite comparar el desempeño ambiental de dos o más estructuras equivalentes.

Como se ha anticipado, este método aparece en 2008, no solo en España, sino también dentro del ámbito internacional. Dicha novedad hace necesario su estudio y revisión en profundidad, de cara a la incorporación de mejoras en versiones futuras.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, los resultados obtenidos permiten enfocar como objeto de estudio preferente determinados aspectos del Anejo 13. En particular, las variables y criterios medioambientales relacionados directamente con la producción de acero y cemento deberían ser objeto de análisis y posibles modificaciones en cuanto a su ponderación, pues con los coeficientes actuales posiblemente su importancia real no esté lo suficientemente representada en el *Índice de Sensibilidad Medioambiental* (ISMA) [1,40]..

La propuesta de una modificación del Anejo 13 excede el objeto de esta publicación, encontrándose entre las previsiones de futuros desarrollos de los autores. Se halla también en estudio la definición de una metodología análoga a la empleada en el ISMA para valorar los aspectos sociales y económicos. Existen ya algunas propuestas de mejora de este anejo, esencialmente conceptuales [40] y no basadas en un trabajo como el aquí resumido.

De todas formas, en función de lo aquí visto, y estando actualmente en desarrollo el oportuno trabajo para analizar el Anejo 13 a la luz de los resultados aquí referidos, hay algunos aspectos que ya se dejan entrever. Entre otras cosas, en cuanto a distancias de transporte, la EHE no diferencia entre las diferentes etapas de transporte aquí vistas, otorgando a este aspecto una importancia menor de la que realmente tiene. Problema parecido pudiera haber con el acero, especialmente en cuanto a la importancia de su contenido en material reciclado. Con acero 100% reciclado, un armado de 50 Kg/m³ supondría casi el 20% de la energía total y más del 5% de las emisiones de CO₂. Estos valores podrían subir hasta alcanzar a los del cemento si se utilizase acero nuevo. Todo ello no parece concordar con lo establecido en la EHE. En otro orden de cosas, la sustitución de árido grueso por material reciclado tiene un impacto muy bajo sobre las emisiones, no siendo coherente con lo que se aprecia a simple vista en el modelo de la EHE. Por el contrario, la optimización del cemento tiene un peso bastante reducido sobre el total del ISMA, cuando supone la mayor parte de los consumos de energía y de las emisiones de CO₂ de los procesos estudiados. De todas formas, para llegar a conclusiones definitivas hay que contar con un análisis de sensibilidad del Anejo 13 que cubra todas las variables que suponen emisiones, y a partir de ello, contrastándolo con lo aquí visto, determinar de forma clara los aspectos que están infravalorados, sobrevalorados o ajustados en dicho modelo. El análisis de sensibilidad es imprescindible porque el peso sobre el ISMA y el ICES (Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad) [1] [40] de las variables del Anejo 13 no es evidente

ni inmediato, ya que varía en función del valor que tomen las demás variables. Esto hace que este análisis sea largo y complejo. Por otro lado, el contraste a partir de lo anterior tampoco es sencillo, ya que diferentes hormigones con diferentes resistencias suponen impactos diferentes, y habría que analizar diversos casos antes de poder hacer comparaciones y llegar a conclusiones definitivas. Los autores confían en estar pronto dispuestos a exponer dichas conclusiones.

5. AGRADECIMIENTOS

Los trabajos reflejados en este artículo se enmarcan en el proyecto MIVES IV, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto código BIA2010-20789-C04-02). Queremos también mostrar nuestro agradecimiento al Prof. D. Manuel Lara Coira (Universidad de La Coruña), por revisar nuestro borrador y realizar sugerencias que han quedado plasmadas en el presente texto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de la Presidencia, "Real Decreto 1247/2008 de 18 de julio, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)", BOE nº 203, 22.08.2008.
- [2] Infocemento, Boletín Enero-2010, www.infocemento.com, accedido el 25.10.2010.
- [3] Comisión Europea, "Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries", 2010, disponible en <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu>, accedido el 10.12.2011.
- [4] Josa A, Aguado A, Heino A, Byars E, Cardim A, "Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU", Cement and Concrete Research Vol. 34 (2004), p. 1313-1320, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.020>
- [5] Josa A, Aguado A, Cardim A, Byars E, "Comparative analysis of the life cycle impact assesment of available cement inventories in the EU", Cement and Concrete Research vol. 37 (2007), p. 781-788, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.004>.
- [6] Ministerio de Medio Ambiente, "Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento", 2004, ISBN: 84-8320-264-6.
- [7] US Environmental Protection Agency, "Portland cement manufacturing", AP42, Fifth Edition, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Vol.1: Stationary Point and Area Sources, Ch.11.6, 1995.
- [8] Internacional Pannel on Climate Change, "Emisiones de la industria de los minerales / Producción de cemento", Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Vol. 3: Procesos industriales y uso de productos, Cap. 2.2., IGES, 2006.
- [9] Berndt M. "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate", Construction and Building Materials vol 23 (2009), p. 2606-2613.
- [10] CEDEX, 2009, Catálogo de residuos utilizables en construcción, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2009, www.cedex-materiales.vsf.es/view/default.aspx, accedido el 27.01.2011.
- [11] Cementos Portland Valderrivas, 2012, www.valderrivas.es, accedido el 10.04.2012.
- [12] CEMEX España, 2012, www.cemex.es , accedido el 10.04.2012.
- [13] Spiegel MR, Schiller JJ, Srinivasan RA, "Probabilidad y Estadística, 2ª Ed.", McGraw-Hill, 2001.
- [14] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, www.magrama.gob.es, ruta Inicio > Cambio Climático > Comercio de Derechos de Emisión, accedido el 10.04.2012.
- [15] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, 2012, www.ptrr-es.es, accedido el 10.04.2012.
- [16] Red Eléctrica de España, 2010, www.ree.es/sistema.electrico/informe-SEE.asp, accedido el 10.04.2012.
- [17] AENOR, Norma UNE-EN ISO 14040:2006 "Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia".
- [18] Cagiao Villar J, "Huella Ecológica del Cemento", Fundación Ingeniería Civil de Galicia, 2011.
- [19] Furuholt E., "Life cycle assessment of gasoline and diesel", Resources, Conservation and Recycling Vol. 14 (1995), p. 251-263 [http://dx.doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00020-J](http://dx.doi.org/10.1016/0921-3449(95)00020-J)
- [20] Comisión Europea, "Decisión 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 y conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo", DOUE 31.08.2007.
- [21] Odeh N, Cockreill T, "Life cycle analysis of UK coal fired power plants", Energy Conversion and Management vol. 49 (2008), p. 212-230, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.014>.
- [22] Babbitt C, Lindner A, "A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida", Journal of Clearner Production, vol 13 (2005), p. 903-912, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.04.007>.
- [23] Spath P, Mann M, Kerr D, "Life cycle assessment of coal-fired power production", National Renewable Energy Laboratory, DOE (US), 1999, NREL/TP-570-25119.
- [24] Kannan R, Tso C, Oshman R, Ho H, "LCA - LCCA of oil-fired steam turbine power plant in Singapore", Energy Conversion and Management vol. 45 (2004), p. 3092-3107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2004.01.005>
- [25] Kannan R, Leong K, Oshman R, Ho H, Tso C., "Gas fired combined cycle plant in Singapore", Energy Conversion and Management vol. 46 (2005), p. 2145-2157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2004.10.021>
- [26] Kannan R., Leong K, Oshman R, Ho H, "Life cycle energy, emissions and cost inventory of power generation technologies in Singapore", Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 11 (2007), p. 702-715, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2005.05.004>.
- [27] Lenzen M, "Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review", Energy Conversion and Management vol. 49 (2008), p. 2178-2199, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.033>.
- [28] Venkatarama B, Jagadish K, "Embodied energy of common and alternative building materials and technologies", Energy and Buildings vol. 35 (2003), p.129-137. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00141-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00141-4)
- [29] Alcorn A. "Embodied energy and CO₂ coefficients for NZ building materials", Centre for Building Performance Research, Victoria University, Wellington, 2003.
- [30] Varun Bhat I, Prakash R, "LCA of renewable energy for electricity generation systems - A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 13 (2009), p.1067-1073. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.004>
- [31] Flower D, Sanjayan J, "Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture", International Journal on Life Cycle Assessment vol 12 (5), 2007, p.282-288, doi: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2007.05.327>.
- [32] O'Brien K, Ménaché J, O'Moore L, "Impact of fly ash content and fly ash transportation distance on embodied greenhouse gas emissions and water compusntion in concrete", International Journal on Life Cycle Assessment vol. 14 (2009), p.621-629. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-009-0105-5>
- [33] Goggins J, Keane T, Kelly A, "The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland", Energy and Buildings vol. 42 (2010), p.735-744. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-009-0105-5>
- [34] Dimoudi A, Tompa C, "Energy and environmental indicators related to construction of office buildings", A. Dimoudi, C. Tompa, Resources, Conservation and Recycling vol 53 (2008), p.86-95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.013>
- [35] Yan H, Shen Q, Fan L, Wang Y, Zhang L, "Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong", Building and Environment Vol. 45 (2010), p.949-955. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.014>
- [36] Hammond G, Jones C, "Inventory of carbon and energy, version 1.6.a", University of Bath, 2008.
- [37] Marceau M, Nisbet M, VanGeem M, "Life cycle inventory of portland cement manufacture", Portland Cement Association, 2006/2010, PCA R&D Serial N° SN2095b.02.
- [38] Nisbet M, VanGeem M, Gadjia J, Marceau M, "Environmental Life Cycle Inventory of portland cement concrete", Portland Cement Association, 2000, PCA R&D Serial N° 2137.
- [39] Cardim de Carvalho Filho A. "Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento - Aportación al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento", Tesis Doctoral, ETSICCP Barcelona, UPC, 2001.
- [40] Aguado A, del Caño A, de la Cruz MP, Gómez D, Josa A. "Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code", Journal of Construction Engineering and Management vol. 138(2) (2012), p. 268-276, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000419](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000419).