



Informes de la Construcción  
Vol. 67, 539, e106  
julio-septiembre 2015  
ISSN-L: 0020-0883  
doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.126>

# Análisis de sensibilidad y estudio crítico del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la Instrucción Española de Hormigón Estructural

## *Sensitivity analysis and critical study of the sustainability assessment model of the Spanish Structural Concrete Code*

J. Mel <sup>(\*)</sup>, D. Gómez <sup>(\*\*)</sup>, P. de la Cruz <sup>(\*\*\*)</sup>, A. del Caño <sup>(\*\*\*)</sup>

### RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de un análisis de sensibilidad del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la Instrucción Española de Hormigón Estructural EHE-08. Expone también los resultados de un análisis de ciclo de vida (ACV) de consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>. A partir de ello se realizan comparaciones, con el objetivo de establecer propuestas de mejora para dicho modelo. La conclusión más importante es que algunos de los pesos y funciones de valor usados en el mismo no son coherentes con los resultados del análisis de ciclo de vida. El modelo de sostenibilidad que se establezca en próximas versiones normativas debería tener otros pesos y funciones que sirvan para acercarse más a los resultados del ACV.

**Palabras clave:** Evaluación de la sostenibilidad; análisis del ciclo de vida; MIVES; hormigón estructural; normativa.

### ABSTRACT

*This paper presents the results of the sensitivity analysis performed for the sustainability assessment model of the Spanish Code on Structural Concrete, EHE-08. It also portrays the results of a life-cycle analysis (LCA) related to energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. Comparisons are made between those findings, for suggesting improvements to the model. The main conclusion is that some weights and value functions employed in the EHE-08 are not consistent with the LCA. The new versions of the Spanish Code should include other weights and value functions to get closer to the LCA results.*

**Keywords:** Sustainability assessment; life-cycle analysis; MIVES; structural concrete; codes.

<sup>(\*)</sup> Ministerio de Defensa. Jefatura de Instalaciones Navales - Arsenal Militar de Ferrol (España).

<sup>(\*\*)</sup> Intacta Gestión Ambiental S.L. A Coruña (España).

<sup>(\*\*\*)</sup> Universidade da Coruña (España).

Persona de contacto/Corresponding author: [alfredo.delcano@gmail.com](mailto:alfredo.delcano@gmail.com) (A. del Caño).

---

**Cómo citar este artículo/Citation:** Mel, J., Gómez, D., de la Cruz, P., del Caño, A. (2015). Análisis de sensibilidad y estudio crítico del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la Instrucción Española de Hormigón Estructural. *Informes de la Construcción*, 67(539): e106, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.126>.

**Licencia / License:** Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de **Informes de la Construcción** se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento no Comercial 3.0. España (cc-by-nc).

Recibido/Received: 02/11/2014  
Aceptado/Accepted: 20/04/2015  
Publicado on-line/Published on-line: 30/09/2015

### 1. INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES

La relación entre hormigón y sostenibilidad estuvo fuera de la normativa española hasta fechas relativamente recientes. Hasta donde se ha podido saber, en otros países sigue sin estar incluida en normativas o códigos estructurales. En 2008 se aprobó la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (en adelante, EHE) (1) (2), vigente en la actualidad. Incluye, por primera vez, un modelo para evaluar la contribución al desarrollo sostenible de una estructura de hormigón. En función de un conjunto de variables medioambientales, sociales y de durabilidad, se calcula el Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES). El modelo de la EHE se basa en el método MIVES (Método Integrado de Valor para la Evaluación de la Sostenibilidad) (3).

Los diferentes aspectos medioambientales del modelo de la EHE se integran en el denominado Índice de Sostenibilidad Medioambiental (ISMA), y se organizan de acuerdo con el árbol de requerimientos que aparece representado en la Figura 1. La EHE denomina requerimientos, sub-requerimientos y criterios a los tres niveles del árbol, tomados de izquierda a derecha.

Cada uno de los 11 criterios medioambientales del árbol incluye un número determinado de variables de diverso tipo: cualitativas y cuantitativas, discretas y continuas. Cada una de estas variables lleva asociada una puntuación establecida en el propio Anejo. Se emplean funciones matemáticas, llamadas funciones de valor (4), para convertir el conjunto de puntuaciones asignadas a las diversas variables de cada criterio en un único valor numérico adimensional que sirve para evaluar dicho criterio. Estas funciones sirven también para contemplar posibles no linealidades en la evaluación. A su vez, el ISMA se calcula por medio de la suma ponderada de

las puntuaciones de todos los criterios, en base a tres conjuntos de coeficientes de ponderación, establecidos respectivamente para criterios, sub-requerimientos y requerimientos. La Figura 1 muestra los valores de dichos coeficientes de ponderación. El ICES se obtiene a partir de los valores del ISMA y de otras variables que tienen en cuenta aspectos sociales y de durabilidad. Todas las variables del modelo toman valores entre 0 y 1, incluidos el ISMA y el ICES.

Como ocurre en todo proyecto, el proceso de elaboración del modelo de la EHE tuvo que ceñirse a unas limitaciones temporales y presupuestarias que, en este caso, no permitieron realizar un estudio como el que aquí se recoge. En otro orden de cosas, era necesario poner de acuerdo a todas las partes interesadas que constituyen el sub-sector del hormigón, con objeto de llegar a un consenso y evitar posibles rechazos al modelo. Todo esto llevó a que determinados aspectos no pudieran ser incluidos en la EHE. La novedad del modelo llevó a que los pesos, las funciones de valor y sus tablas de puntuaciones fueran consensuados entre los expertos del sector que participaban en el proyecto, al no existir bases de datos que permitiesen realizar un análisis más riguroso. Por todo ello, cabía preguntarse si realmente dichas variables, pesos, funciones y tablas de puntuación son suficientemente coherentes con un análisis de ciclo de vida (ACV) (5) (6) (7).

La respuesta a esta cuestión no es sencilla, como se va a ver aquí. El presente artículo tiene como objetivo esencial establecer propuestas de mejora con respecto a la influencia que tienen en el ICES las variables medioambientales de la EHE relacionadas con el consumo de energía y las emisiones de contaminantes. Los autores no pretenden la crítica sino sugerir posibles soluciones, entre otras cosas porque dos de ellos han participado en la redacción del Anejo 13 de la EHE.

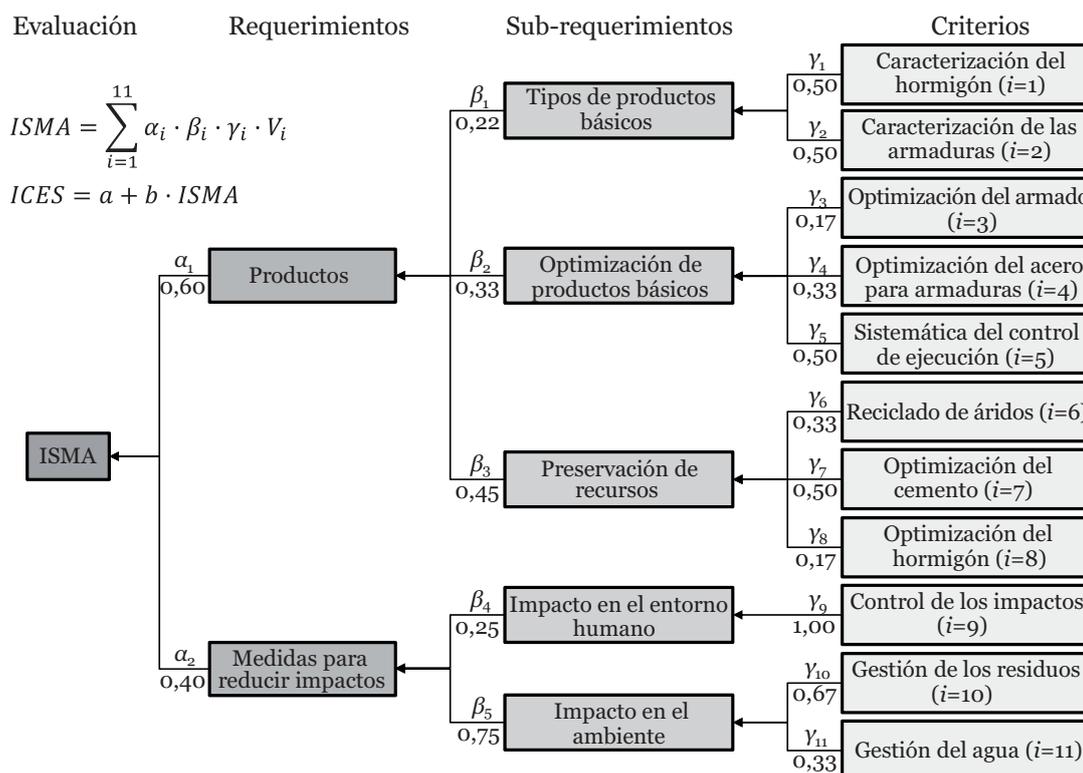


Figura 1. Árbol de requerimientos del modelo de sostenibilidad de la EHE-08.

Para poder satisfacer el mencionado objetivo general se ha trabajado en dos frentes. El primer objetivo específico es estudiar la influencia que tienen los parámetros de entrada del ICES sobre este índice de sostenibilidad. Los pesos del árbol, los parámetros de las funciones de valor, y las tablas de puntuaciones que forman parte de dichas funciones, son las variables que determinan esa influencia. Para satisfacer este objetivo se ha realizado un análisis de sensibilidad que tiene en cuenta todos y cada uno de los aspectos de la EHE, y cuyos resultados se exponen aquí.

El segundo objetivo específico es realizar una estimación de las consecuencias medioambientales de la construcción de estructuras de hormigón, teniendo en cuenta el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, por medio de un ACV. A partir de los resultados de estos dos objetivos específicos se procede a la comparación de los resultados obtenidos, estableciéndose conclusiones con respecto al objetivo general.

Antes de seguir adelante hay que hacer dos aclaraciones. Alguien puede preguntarse sobre la idoneidad y oportunidad de aplicar un análisis de ciclo de vida, o bien un modelo como el de la EHE. Ambos tienen ventajas e inconvenientes. El ACV sólo se ha referido, normalmente, a los aspectos medioambientales, si bien cada vez más se están haciendo ACVs relativos a los aspectos económicos y sociales. Tanto en un caso como en el otro, incluso en los países más avanzados, la mayoría de arquitectos e ingenieros no suelen estar preparados todavía para afrontar este tipo de estudios que, por otro lado, son lo suficientemente recientes como para que aún no haya bases de datos tan completas y rigurosas como sería necesario. Además, en la mayoría de los casos, las bases de datos existentes no se ajustan a la realidad del entorno geográfico en que se desenvuelve el proyecto. Por su parte, un modelo como el de la EHE no entra en el detalle de los impactos sobre el planeta, pero utiliza variables que el profesional del sector conoce bien y maneja sin grandes problemas. Obviamente, dos modelos basados en cada una de dichas técnicas, que estén bien concebidos e implantados, deben ayudar al técnico a conseguir una mayor contribución de la estructura a la sostenibilidad y, por tanto, cumplir su misión, con consecuencias parecidas. El método MIVES no tiene nada que ver en todo esto, porque también se puede aplicar a un modelo de ACV, con objeto de integrar todos los indicadores ambientales, económicos y sociales en un solo índice global, de manera similar a lo que se ha hecho en la EHE.

## 2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

### 2.1. Planteamiento general

La manera habitual de determinar la sensibilidad de una función frente a una de sus variables supone calcular la variación provocada en dicha función por cambios en el valor de la variable, mientras permanecen constantes los restantes parámetros.

En base a la formulación matemática del ICES, existen dos particularidades que condicionan este análisis. Por un lado, la sensibilidad del ICES frente a cada variable no es un valor único y constante, sino que depende de la magnitud de la variación que se produzca en la puntuación de dicha variable. Por otro, la sensibilidad del ICES ante una variable depende también de los valores que adopten las restantes variables.

Por tanto, los objetivos principales del análisis de sensibilidad aquí resumido han sido (I) el establecimiento de la fun-

ción de sensibilidad de cada variable y (II) la determinación de la sensibilidad máxima que puede llegar a tener cada una de ellas. Matemáticamente, la sensibilidad máxima se corresponderá con un extremo relativo de la función de sensibilidad para la variable en cuestión, dentro del rango de valores a estudiar.

### 2.2. Metodología

#### 2.2.1. Funciones de sensibilidad.

La expresión general de la EHE para el cálculo del ICES (1) se corresponde con la ecuación [1], donde  $a$  es el coeficiente de contribución por aspectos sociales, definido según la ecuación [2],  $b$  el coeficiente de extensión de vida útil definido por la ecuación [3],  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  y  $\gamma_i$  los coeficientes de ponderación indicados en la Figura 1, y  $V_i$  las funciones de valor correspondientes a cada criterio, según la ecuación [4].

$$ICES = a + b \cdot ISMA = a + b \cdot \sum_{i=1}^{i=11} \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i \leq 1 \quad [1]$$

$$a = \sum_{i=1}^{i=5} a_i \quad [2]$$

$$b = \frac{t_g}{t_{g,\min}} \leq 1,25 \quad [3]$$

$$V_i = K_i \cdot \left[ 1 - e^{-m_i \cdot \left(\frac{P}{n_i}\right)^{A_i}} \right] \quad [4]$$

Sustituyendo las expresiones [2], [3] y [4] en [1] se obtiene la ecuación [5], que será tomada como base de partida para el análisis de sensibilidad.

$$ICES = \sum_{j=1}^{j=5} a_j + \frac{t_g}{t_{g,\min}} \cdot \sum_{i=1}^{i=11} \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot K_i \cdot \left[ 1 - e^{-m_i \cdot \left(\frac{P}{n_i}\right)^{A_i}} \right] \quad [5]$$

Se va a llamar  $S_{ICES}(i_x)$  a la sensibilidad del ICES ante una variación de la variable  $x$  del criterio  $i$ . Es decir,  $S_{ICES}(i_x)$  es la diferencia entre el valor del ICES final, una vez producida la variación, y el valor inicial, previo a la modificación del valor de  $x$ , según se muestra en la ecuación [6].

$$S_{ICES}(i_x) = ICES_{fin}(i_x) - ICES_{inic}(i_x) \quad [6]$$

Para establecer las funciones de sensibilidad frente a cada variable será necesario calcular la diferencia que existe en el valor del ICES entre dos escenarios, inicial y final, cuando la única variable que modifica su valor y puntuación asociada es aquella que se está estudiando en cada momento.

Evaluando la expresión [6] entre dos escenarios cualesquiera inicial y final, donde solamente varíe el valor de una de las variables  $a_j$ , perteneciente al coeficiente de contribución social, se puede observar que la variación del ICES solo depende del valor o puntuación inicial y final de la variable analizada, según la ecuación [7].

$$S_{ICES}(S_j) = a_{j_{fin}} - a_{j_{inic}} \quad [7]$$

Si se hace lo mismo con la variable  $t_g$ , que es la única que se utiliza en el coeficiente de extensión de vida útil, se aprecia que la sensibilidad del ICES frente a  $t_g$  solo depende de las variables medioambientales del ICES, según la ecuación [8].

$$S_{ICES}(E_{t_g}) = \frac{t_{g,fin}}{t_{g,min}} \cdot ISMA_{fin} - \frac{t_{g,inic}}{t_{g,min}} \cdot ISMA_{inic} = \frac{(t_{g,fin} - t_{g,inic})}{t_{g,min}} \cdot ISMA \quad [8]$$

Por último, aplicando la ecuación [6] para una variable  $k$  perteneciente a un criterio medioambiental  $i$ , se concluye que la sensibilidad del ICES solo depende de la variable  $t_g$  del coeficiente de contribución económica, y de la puntuación inicial del criterio al que pertenece la variable analizada. Dicho de otro modo, depende de los valores iniciales que tengan todas las variables pertenecientes al criterio medioambiental de la variable analizada, incluida ella misma. Esto se refleja en la ecuación [9].

$$S_{ICES}(M_{i,k}) = \frac{t_g}{t_{g,min}} \cdot \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot K_i \cdot \left[ 1 - e^{-m_i \left(\frac{P_{i,fin}}{n_i}\right)^{A_i}} \right] - \left[ 1 - e^{-m_i \left(\frac{P_{i,inic}}{n_i}\right)^{A_i}} \right] = \frac{t_g}{t_{g,min}} \cdot \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot K_i \cdot \left[ e^{-m_i \left(\frac{P_{i,inic}}{n_i}\right)^{A_i}} - e^{-m_i \left(\frac{P_{i,fin}}{n_i}\right)^{A_i}} \right] \quad [9]$$

Debe de tenerse en cuenta que los diferentes criterios considerados en el modelo de la EHE tienen limitado su valor máximo, de forma que nunca se pueda exceder el 100 % de la puntuación asignada a cada uno. Esta circunstancia influye en los cálculos realizados, dado que en algunos casos el incremento de valor de una variable no implica influencia alguna en el valor global del criterio, al haber alcanzado éste ya su máximo, por acumulación de puntuaciones de las restantes variables.

### 2.2.2. Sensibilidades máximas

La sensibilidad máxima del ICES frente a una variable es la máxima variación que se puede producir en el ICES cuando el parámetro estudiado pasa de su valor de mínima contribución a la sostenibilidad a su valor de máxima contribución a la misma, mientras que los valores y puntuaciones del resto de variables permanecen constantes.

Por ejemplo, la máxima variación en el ICES que puede provocar la variable «Condición medioambiental de la empresa constructora», cuando dicha condición pasa de ser la de mínima contribución («No dispone de compromiso ni distintivo medioambiental») a la de máxima satisfacción («Dispone de distintivo medioambiental ISO 14001 o registro EMAS») es del 16,11 % del valor máximo del ICES, que es 1. Esto supone que, como máximo, el ICES puede aumentar o disminuir su valor en 0,1611 puntos por causa de esta variable.

La sensibilidad máxima ante variaciones en los parámetros del coeficiente social es constante, de acuerdo con lo mostrado en la ecuación [10]. Por el contrario, ante variaciones en los parámetros del coeficiente de extensión de la vida útil, la sensibilidad máxima depende del valor tomado por el ISMA, de acuerdo con lo mostrado en la ecuación [11].

$$S_{ICES\max}(S_j) = a_{j_{MaxSost}} - a_{j_{MinSost}} \quad [10]$$

$$S_{ICES\max}(E_{t_g}) = \frac{(t_{g_{MaxSost}} - t_{g_{MinSost}})}{t_{g,min}} \cdot ISMA = \frac{(1,25 \cdot t_{g,min} - t_{g,min})}{t_{g,min}} \cdot ISMA = 0,25 \cdot ISMA \quad [11]$$

Hay que tener en cuenta que, según la ecuación [3], el valor máximo del término  $t_g/t_{g,min}$  está limitado superiormente a 1,25, por lo que la sensibilidad máxima de cualquier variable medioambiental se producirá cuando dicho coeficiente valga 1,25. Por su parte, la variación en la puntuación  $P_i$  cuando la variable  $k$  pasa de su mínima a su máxima contribución a la sostenibilidad,  $\Delta P_{i,k}$ , viene dada por las diversas tablas del Anejo 13 de la EHE. Por tanto, la incógnita en este caso es la puntuación inicial  $P_{i,inic}$  para la cual la sensibilidad del ICES frente a la variable  $k$  es máxima, ya que el resto de parámetros son coeficientes o valores conocidos. En consecuencia, el problema matemático consiste en el cálculo del máximo absoluto de una función de  $P_{i,inic}$  según la ecuación [12], continua y  $n$ -derivable, dentro de un intervalo de posibles valores de  $P_{i,inic}$ .

$$S_{ICES\max}(M_{i,k}) = 1,25 \cdot \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot K_i \cdot \left[ e^{-m_i \left(\frac{P_{i,inic}}{n_i}\right)^{A_i}} - e^{-m_i \left(\frac{P_{i,inic} + \Delta P_{i,k}}{n_i}\right)^{A_i}} \right] \quad [12]$$

La resolución de este problema pasa por el empleo de los procedimientos habituales del cálculo infinitesimal para la determinación de extremos condicionados en funciones de una variable. Derivando la función de sensibilidad respecto a  $P_{i,inic}$  e igualando ésta a cero se obtiene la expresión [13], ecuación que no es resoluble por métodos analíticos. Para obtener de forma numérica sus raíces para cada una de las variables de los criterios medioambientales se ha empleado el método de falsa posición (8), dadas su sencillez de programación y aceptable velocidad de convergencia.

$$S'_{ICES\max}(M_{i,k}) = 1,25 \cdot \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot K_i \cdot \frac{m_i \cdot A_i}{n_i^{A_i}} \cdot \left[ P_{i,inic}^{A_i-1} \cdot e^{-m_i \left(\frac{P_{i,inic}}{n_i}\right)^{A_i}} - (P_{i,inic} + \Delta P_{i,k})^{A_i-1} \cdot e^{-m_i \left(\frac{P_{i,inic} + \Delta P_{i,k}}{n_i}\right)^{A_i}} \right] = 0 \quad [13]$$

Los resultados del análisis de las diferentes variables contempladas en el modelo de la EHE según el método que se acaba de exponer se presentan en la Tabla 1. A pesar de que hasta ahora se haya considerado que la ecuación [12] es continua y  $n$ -derivable, la realidad es que el modelo de la EHE incluye variables discretas. Esto provoca que, en algunos casos, el escenario determinado teóricamente como de máxima sensibilidad no pueda darse en la realidad, al no estar contemplado el valor teórico de  $P_{i,inic}$  de dicho escenario entre los posibles valores que puede tomar la variable discreta. En estos casos el punto de máxima sensibilidad corresponde al valor inmediatamente anterior o posterior a  $P_{i,inic}$ .

De acuerdo con la Tabla 1, con una sensibilidad máxima ( $S_{ICES\max}$ ) superior al 10 %, las variables que más influyen en el valor del ICES son (por orden decreciente de sensibilidad):

**Tabla 1.** Sensibilidad máxima del ICES frente a las diferentes variables del modelo de la EHE.

| Variable   |   | SICES MAX |
|--|---|-----------|
| <b>Coefficiente de contribución social (a)</b>                               |   |           |
| $j = 1$  | El Constructor aplica métodos innovadores resultado de proyectos de I+D+i de los últimos 3 años.  | 2,00 %    |
| $j = 2$  | Más del 30 % del personal que trabaja en la ejecución ha tenido cursos de formación específica en aspectos técnicos, de calidad o medioambientales.                                   | 2,00 %    |
| $j = 3$  | Se adoptan medidas de seguridad y salud adicionales a las establecidas reglamentariamente.  | 4,00 %    |
| $j = 4$  | Se elabora una página web pública y específica para informar al ciudadano, incluyendo características y plazos de ejecución, así como implicaciones económicas y sociales de la obra. | 2,00 %    |
| $j = 5$  | Obra declarada de interés general por la Administración Pública competente.   | 4,00 %    |
| <b>Coefficiente de contribución por extensión de la vida útil (b)</b>        |   |           |
| $t_b$  | Vida útil contemplada en el proyecto para la estructura.  | 20,00 %   |
| <b>Criterio medioambiental caracterización del hormigón (i = 1)</b>          |   |           |
| $k = 1$  | Porcentaje de hormigón suministrado por cada central de hormigón en obra.   | 8,25 %    |
| $k = 2$  | Porcentaje de hormigón suministrado por cada central externa de hormigón preparado.   | 8,25 %    |
| $k = 3$  | Porcentaje de hormigón en elementos prefabricados suministrado por cada prefabricador.  | 7,83 %    |
| $k = 4$  | Condición medioambiental de las centrales de hormigón en obra.  | 7,57 %    |
| $k = 5$  | Condición medioambiental de las centrales de hormigón preparado.  | 6,82 %    |
| $k = 6$  | Condición medioambiental de las instalaciones de prefabricación.  | 13,51 %   |
| $k = 7$  | Condición medioambiental de la empresa constructora.  | 16,11 %   |
| $k = 8$  | Distancia a la obra de las centrales de hormigón preparado.   | 0,00 %    |
| $k = 9$  | Distancia a la obra de las instalaciones de prefabricación.   | 1,43 %    |
| <b>Criterio medioambiental caracterización de las armaduras (i = 2)</b>      |   |           |
| $k = 1$  | Porcentaje de armaduras suministradas por cada instalación de ferralla en obra.   | 8,25 %    |
| $k = 2$  | Porcentaje de armaduras suministradas por cada instalación de ferralla ajena a la obra.   | 8,25 %    |
| $k = 3$  | Porcentaje de armaduras en elementos prefabricados de hormigón suministradas por cada instalación de prefabricación.  | 7,83 %    |
| $k = 4$  | Condición medioambiental de las instalaciones de ferralla en obra.  | 7,58 %    |
| $k = 5$  | Condición medioambiental de las instalaciones de ferralla ajenas a la obra.   | 6,46 %    |
| $k = 6$  | Condición medioambiental de las instalaciones de ferralla prefabricada.   | 13,51 %   |
| $k = 7$  | Condición medioambiental de la empresa constructora.  | 16,11 %   |
| $k = 8$  | Distancia a la obra de las instalaciones de ferralla ajena a la obra.   | 0,00 %    |
| $k = 9$  | Distancia a la obra de las instalaciones de ferralla prefabricada.  | 1,49 %    |
| <b>Criterio medioambiental optimización del armado (i = 3)</b>               |   |           |
| $k = 1$  | Tipo de hormigón empleado (armado o pretensado).  | 1,38 %    |
| $k = 2$  | Porcentaje de losas armadas con malla electrosoldada o armadura de mallazo soldado.   | 2,68 %    |
| $k = 3$  | Sistema de unión utilizado (soldadura, medios mecánicos).   | 1,38 %    |
| $k = 4$  | Porcentaje de armaduras elaboradas con formas según UNE 36.831.   | 2,68 %    |
| $k = 5$  | Utilización de armadura activa.   | 1,38 %    |
| <b>Criterio medioambiental optimización del acero para armaduras (i = 4)</b> |   |           |
| $k = 1$  | Certificación medioambiental de la producción de acero.   | 1,27 %    |
| $k = 2$  | Certificación de calidad del acero.   | 8,17 %    |
| $k = 3$  | Producción de acero a partir del reciclado de chatarra.   | 2,54 %    |
| $k = 4$  | Producción de acero sometida a las exigencias del Protocolo de Kyoto.   | 1,70 %    |
| $k = 5$  | Aprovechamiento de las escorias del acero.  | 1,27 %    |
| $k = 6$  | Materias primas y acero sometido a controles de emisión radiológicos.   | 1,70 %    |
| <b>Criterio medioambiental sistemática del control de ejecución (i = 5)</b>  |   |           |
| $k = 1$  | Utilización de elementos de hormigón con distintivo de calidad.   | 12,38 %   |
| $k = 2$  | Aplicación de coeficiente de seguridad disminuido del material acero.   | 12,38 %   |
| <b>Criterio medioambiental reciclado de áridos (i = 6)</b>                   |   |           |
| $k = 1$  | Porcentaje de áridos reciclados en la producción del hormigón.  | 11,14 %   |
| <b>Criterio medioambiental optimización del cemento (i = 7)</b>              |   |           |
| $k = 1$  | Certificación medioambiental de la producción de cemento.   | 2,63 %    |
| $k = 2$  | Certificación de calidad del cemento.   | 14,51 %   |
| $k = 3$  | Empleo de adiciones en la fabricación del cemento, en una cuantía $\leq 20$ %.  | 6,09 %    |
| $k = 4$  | Empleo de adiciones en la fabricación del cemento, en una cuantía $> 20$ %.   | 8,64 %    |
| $k = 5$  | Producción del cemento sometida a las exigencias del Protocolo de Kyoto.  | 3,51 %    |
| $k = 6$  | Empleo de combustibles alternativos o de menor emisión de CO <sub>2</sub> en la producción del cemento.   | 2,63 %    |
| <b>Criterio medioambiental optimización del hormigón (i = 8)</b>             |   |           |
| $k = 1$  | Empleo de cementos tipo CEM I.  | 2,07 %    |
| $k = 2$  | Certificación medioambiental de la empresa suministradora de hormigón.  | 5,74 %    |
| $k = 3$  | Empleo de cenizas volantes en la fabricación del hormigón.  | 5,74 %    |
| $k = 4$  | Empleo de humo de sílice en la fabricación del hormigón.  | 5,74 %    |
| <b>Criterio medioambiental control de los impactos (i = 9)</b>               |   |           |
| $k = 1$  | Empleo en obra de aspersores contra la generación de polvo.   | 2,60 %    |
| $k = 2$  | Pavimentación de los accesos a la obra o empleo de sistemas de limpieza de neumáticos.  | 2,60 %    |
| $k = 3$  | Utilización de pantallas u otros dispositivos de retención de polvos.   | 2,60 %    |
| $k = 4$  | Empleo de estabilizantes químicos para reducir la formación de polvo.   | 2,60 %    |
| $k = 5$  | Cobertura con toldos y lonas del material expuesto a la intemperie, incluso en el transporte.   | 2,60 %    |
| <b>Criterio medioambiental gestión de los residuos (i = 10)</b>              |   |           |
| $k = 1$  | Gestión de los productos de excavación.   | 3,57 %    |
| $k = 2$  | Gestión de los residuos de construcción y demolición.   | 15,23 %   |
| $k = 3$  | Utilización de hormigón con distintivo de calidad.  | 6,48 %    |
| $k = 4$  | Utilización de probetas cúbicas para el control de calidad del hormigón.  | 6,48 %    |
| <b>Criterio medioambiental gestión del agua (i = 11)</b>                     |   |           |
| $k = 1$  | Certificación medioambiental de la empresa constructora.  | 16,11 %   |
| $k = 2$  | Empleo de técnicas de curado eficiente, en relación al consumo de agua.   | 3,71 %    |
| $k = 3$  | Utilización de dispositivos de ahorro de agua.  | 3,71 %    |
| $k = 4$  | Utilización de contenedores para recogida y aprovechamiento de agua de lluvia.  | 3,71 %    |

- La condición medioambiental del contratista (que se puntúa en tres variables diferentes:  $i = 1, k = 7$ ;  $i = 2, k = 7$ ;  $i = 11, k = 1$ ; cada una con  $S_{ICES\ MAX} = 16,1$  %).
- La vida útil de proyecto de la estructura ( $t_g$ ; 20 %).
- La gestión de los residuos de construcción y demolición ( $i = 10, k = 2$ ; 15,2 %).
- La certificación de calidad del cemento ( $i = 7, k = 2$ ; 14,5 %).
- La condición medioambiental de las empresas prefabricadoras ( $i = 1, k = 6$ ; 13,5 %).
- La de las empresas de ferralla prefabricada ( $i = 2, k = 6$ ; 13,5 %).
- La del fabricante de hormigón preparado (que se puntúa en dos variables diferentes:  $i = 1, k = 5$  con 6,8 %;  $i = 8, k = 2$  con 5,7 %).
- La utilización de elementos de hormigón con distintivo de calidad ( $i = 5, k = 1$ ; 12,4 %).
- La aplicación de un coeficiente de seguridad reducido para el acero ( $i = 5, k = 2$ ; 12,4 %).
- Y el uso de árido reciclado ( $i = 6, k = 1$ ; 11,1 %).

Con una  $S_{ICES\ MAX}$  entre el 5 y el 10 %, el resto de variables cuya influencia no es insignificante son:

- El empleo de adiciones en la fabricación del cemento ( $i = 7, k = 3$  y 4; 8,6 %).
- La certificación de calidad del acero ( $i = 4, k = 2$ ; 8,2 %).
- La condición medioambiental de las instalaciones de hormigón en obra ( $i = 1, k = 4$ ; 7,6 %).
- La de las instalaciones de ferralla en obra ( $i = 2, k = 4$ ; 7,6 %).
- La de las empresas de ferralla convencional;  $i = 2, k = 5$ ; 6,5 %).
- La utilización de hormigón con distintivo de calidad ( $i = 10, k = 3$ ; 6,5 %).
- El uso de probetas cúbicas para el control de calidad del hormigón ( $i = 10, k = 4$ ; 6,5 %).
- Y el uso de cenizas volantes ( $i = 8, k = 3$ ; 5,7 %) y humo de sílice ( $i = 8, k = 4$ ; 5,7 %) en la fabricación del hormigón.

### 3. CONSUMO DE ENERGÍA Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub> EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

#### 3.1. Estimación de impactos. Metodología

Para el estudio de los impactos ambientales provocados por la actividad humana se han desarrollado indicadores que sirven para medir, entre otros aspectos, los consumos de materias primas, las emisiones a la atmósfera y al agua, o la generación de residuos, y las consecuencias sobre el planeta de dichos consumos y emisiones: calentamiento global, acidificación del medio, o eutrofización de las aguas, entre otras (5) (6) (7) (9).

Con objeto de simplificar el análisis, se ha realizado una aproximación al comportamiento ambiental del hormigón estructural mediante los dos indicadores de mayor relevancia: el consumo de energía y la emisión de CO<sub>2</sub>. El primero es de gran importancia, ya que el problema de la energía es uno de los mayores que hay planteados en la actualidad en el planeta. Por su parte, el indicador de emisiones de CO<sub>2</sub> es el de mayor importancia de todos los relacionados con el impacto medioambiental. Por otro lado, el uso de estos dos parámetros está extendido dentro del ámbito de los análisis de ciclo de vida, varios de los cuales han servido como fuente de información para este trabajo (10) (11) (12) (13) (entre otros).

El empleo de un conjunto más completo de indicadores debe llevar a conclusiones parecidas. De hecho, como se va a ver aquí, si se considera solamente el consumo de energía, las conclusiones son similares a las que se derivan de considerar únicamente las emisiones de CO<sub>2</sub>. Pudiera suceder que aplicando solamente un indicador ambiental de los restantes, las conclusiones fuesen diferentes, pero como dichas conclusiones deben tomarse en función del conjunto de indicadores teniendo en cuenta la importancia de cada uno, las consecuencias de conjunto van a ser parecidas a las que aquí se van a resumir. Debe tenerse en cuenta, por un lado, que estas dos variables medioambientales son las más importantes y están interrelacionadas con otras, como es el caso del consumo de recursos naturales. Por otro lado, la diferencia de variables utilizadas en el ISMA y en un ACV es tal, que resulta imposible conseguir que ambos modelos se correspondan exactamente. No se trata, por tanto, de que el modelo de sostenibilidad normativo español se corresponda fielmente con un ACV, sino de que la importancia de sus variables tenga un orden de magnitud parecido al que se deriva de un ACV.

Los datos referidos a emisiones de CO<sub>2</sub> y consumos energéticos se toman de trabajos previos de los autores, en los cuales se estima el valor de estos indicadores para los distintos componentes y procesos que dan lugar a una estructura de hormigón (14) (15) (16) (17) (18). Estos estudios se han realizado en base a la literatura existente y a información proporcionada por diferentes empresas y profesionales. En particular, se han empleado datos estadísticos relativos al funcionamiento del conjunto completo de cementeras españolas (15), registros de producción y consumos de una decena de canteras españolas (16), e información técnica de fabricantes de plantas de hormigón preparado, auto-hormigoneras y equipos de puesta en obra (bombas, vibradores) (18). Además, se han mantenido entrevistas con expertos vinculados a dichos sub-sectores (14) (15) (16) (18), así como al de la producción de acero para armaduras (17). A partir de dichos datos se ha elaborado un caso práctico que se va a utilizar en la posterior comparación con el modelo de la EHE.

#### 3.2. Caso práctico nº 1

La Tabla 2 se ha elaborado a partir de los resultados de los estudios realizados por los autores (14) (15) (16) (17) (18), y contiene los parámetros de energía y emisiones estimados para un hormigón HA-25 de consistencia blanda y con un contenido en acero de 50 kg por metro cúbico. Las estimaciones empleadas son los valores medios que proceden del estudio de todas las plantas españolas y, por tanto, de todos los tipos de cemento producidos. La tabla ofrece, para cada parámetro, un rango de valores esperados (mínimo - máximo), así como un valor intermedio que se considera el más probable. Los valores de consumo y emisiones dependen de diversas circunstancias; así, entre otras muchas, dependen de la fábrica de la que proviene el cemento, la distancia entre la planta de hormigón y la obra, o el tipo de maquinaria empleada para bombear y vibrar el hormigón. Los resultados totales mínimos y máximos son en realidad las envolventes correspondientes a los diversos casos que se podrían dar. La probabilidad de que concurren todas las circunstancias que ocasionan los valores mínimos y máximos es muy baja. Los valores intermedios permiten establecer los órdenes de magnitud de la contribución de cada proceso o componente al impacto global estudiado, expresado en tanto por ciento, que se recoge en dicha tabla.

**Tabla 2.** Caso nº 1. Consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de masa para un hormigón HA-25 B con 50 kg de acero por m<sup>3</sup>.

| <b>Hormigón HA-25 B / armado con 50 kg acero/m<sup>3</sup></b><br><b>Dosificación: 341,7 kg cemento, 1.880,9 kg áridos, 205 kg agua, 5 kg aditivos.</b> |  |                  |   |                  |
|---|--|------------------|---|------------------|
| <b>Proceso</b>  | <b>Consumo de energía (MJ/m<sup>3</sup>)</b> |                  | <b>Emisiones de CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b> |                  |
|   | Min / Med / Max                              | % <sub>med</sub> | Min / Med / Max                                       | % <sub>med</sub> |
| Producción de cemento   | 1101,98 / 1499,38 / 2054,30                  | 59,30            | 198,53 / 265,84 / 340,67                              | 78,73            |
| Producción de acero   | 332,00 / 507,0 / 681,50                      | 20,05            | 17,00 / 31,15 / 45,65                                 | 9,23             |
| Producción de áridos  | 39,50 / 63,95 / 80,88                        | 2,53             | 2,45 / 4,14 / 5,08                                    | 1,23             |
| Producción de aditivos  | 10,50 / 62,25 / 114,00                       | 2,46             | 0,38 / 3,19 / 6,00                                    | 0,94             |
| Total producción de componentes   | 1483,98 / 2132,58 / 2930,68                  | 84,34            | 218,35 / 304,32 / 397,40                              | 90,12            |
| Preparación del hormigón  | 8,76 / 9,38 / 9,95                           | 0,37             | 0,43 / 0,46 / 0,48                                    | 0,13             |
| Preparación de la ferralla  | 10,00 / 15,00 / 20,00                        | 0,59             | 0,50 / 0,95 / 1,35                                    | 0,28             |
| Puesta en obra  | 15,80 / 36,57 / 56,80                        | 1,45             | 1,17 / 7,93 / 15,86                                   | 2,35             |
| Total preparación y ejecución   | 34,56 / 60,95 / 86,75                        | 2,41             | 2,10 / 9,33 / 17,69                                   | 2,76             |
| Transporte de cemento   | 21,11 / 100,46 / 200,92                      | 3,97             | 1,76 / 7,03 / 14,06                                   | 2,08             |
| Transporte de árido   | 41,47 / 82,95 / 165,90                       | 3,28             | 2,90 / 5,81 / 11,61                                   | 1,72             |
| Transporte de aditivos  | 0,37 / 1,10 / 2,21                           | 0,04             | 0,03 / 0,08 / 0,15                                    | 0,02             |
| Transporte de acero   | 7,35 / 37,7 / 69,00                          | 1,49             | 0,52 / 2,66 / 4,89                                    | 0,79             |
| Transporte de ferralla  | 3,65 / 7,35 / 14,70                          | 0,29             | 0,26 / 0,52 / 1,03                                    | 0,15             |
| Transporte de hormigón  | 52,74 / 105,48 / 210,98                      | 4,17             | 3,96 / 7,93 / 15,86                                   | 2,35             |
| Total transportes   | 130,70 / 335,04 / 663,70                     | 13,25            | 9,43 / 24,01 / 47,60                                  | 7,11             |
| <b>TOTAL</b>  | <b>1649,20 / 2528,60 / 3681,10</b>           | <b>100</b>       | <b>229,88 / 337,67 / 462,70</b>                       | <b>100</b>       |

Con base en todo lo expuesto, puede afirmarse que la producción de cemento es, con diferencia, el aspecto de mayor incidencia ambiental dentro de una estructura de hormigón; en particular, la producción de clinker es causa de la mayor parte de dicho impacto. Por detrás se encuentra la producción de acero, cuya importancia depende fuertemente de la cuantía de armado. En tercer lugar están los transportes, en los cuales la distancia a cubrir marca las diferencias.

### 3.3. Caso práctico nº 2

Una cementera española únicamente produjo, en un año determinado, cementos de los tipos CEM I (sin adiciones) y CEM II (con adición de cenizas volantes y calizas), sin emplear combustibles alternativos (15). Con los cementos de esta planta se han determinado el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociados a un hormigón armado con 50 kg/m<sup>3</sup> de acero. Según la bibliografía y las fuentes del sec-

tor consultadas, la práctica totalidad del acero empleado en la producción de armaduras en nuestro país procede de acero reciclado (17). No obstante, se incluye aquí una hipótesis de utilización de acero primario, dado que la EHE considera esta posibilidad. También se analiza el efecto sobre las emisiones de sustituir un 15 % de la energía térmica de origen fósil por energía procedente de biomasa, para fabricar el mismo tipo de cemento.

El porcentaje medio de adiciones en el CEM II es del 17 %. Los factores de consumo energético y emisión de CO<sub>2</sub> relativos al acero primario proceden de las referencias (13) y (17). En la Tabla 3 se resumen los resultados del cálculo.

El hormigón armado identificado como T3.1 en dicha Tabla 3 es análogo al de la Tabla 2 en cuanto a dosificación y armado, si bien ahora con cemento CEM I procedente de la planta estudiada en este segundo caso práctico (4,923 MJ/kg y 0,916 kgCO<sub>2</sub>/kg).

**Tabla 3.** Caso nº 2. Consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de masa para diferentes casos de hormigón armado.

| <b>Cód. Tipo de hormigón armado</b>                 | <b>Energía (MJ/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Emisiones (kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Δ Energ.</b> | <b>Δ Emis.</b> |
|---|-----------------------------------|---|-----------------|----------------|
| T3.1. HA-25 B acero reciclado – CEM I               | 2.711,42                          | 384,93  | –               | –              |
| T3.2. HA-25 B acero reciclado – CEM II              | 2.368,76                          | 316,25  | –12,64 %        | –17,84 %       |
| T3.3. HA-25 B acero reciclado – CEM I 15 % biomasa  | 2.711,42                          | 339,07  | 0,00 %          | –11,91 %       |
| T3.4. HA-25 B acero reciclado – CEM II 15 % biomasa | 2.368,76                          | 280,77  | –12,64 %        | –27,06 %       |
| T3.5. HA-25 B acero primario – CEM I                | 3.974,42                          | 498,28  | +46,58 %        | +29,45 %       |

T3.2 difiere de T3.1 en que el cemento incluye adiciones en un porcentaje medio del 17 % (CEM II: 3,920 MJ/kg; 0,715 kgCO<sub>2</sub>/kg). El empleo de adiciones reduce el consumo energético y las emisiones al 12 % y 17 %, respectivamente.

T3.3 es como T3.1, pero ahora el cemento se produce mediante el uso parcial de combustible biogénico alternativo de origen vegetal, equivalente al 15 % de la energía térmica total necesaria, y cuyas emisiones de CO<sub>2</sub> se asumen como nulas (19). Esto lleva a una menor emisión de CO<sub>2</sub> en la producción de cemento (0,782 frente a 0,916 kgCO<sub>2</sub>/kg) y también en el hormigón armado (cerca de un 12 % menor). Nótese que para esta biomasa las emisiones de otro tipo (SOx, NOx, partículas, etc.) no son nulas, y por tanto las cifras globales serían mejores que con combustibles convencionales, pero no tan positivas como aquí se refleja.

T3.4 incluye cemento con adiciones y empleo de combustible alternativo. Todo ello lleva a una disminución de emisiones de un 27 % con respecto a T3.1.

Finalmente T3.5 es igual que T3.1, pero con acero primario. Esto supone un consumo de energía de 35,4 MJ/kg y unas emisiones de CO<sub>2</sub> de 2,89 kgCO<sub>2</sub>/kg (13) (17), frente a los 10,14 MJ/kg y 0,623 kgCO<sub>2</sub>/kg del acero reciclado. Consumo energético y emisiones crecen en un 46 % y 29 %, respectivamente, con respecto a T3.1.

Se puede estudiar también la influencia de los procesos de transporte. En la Tabla 2 se incluyen los resultados del estudio de los diferentes procesos de transporte que, en conjunto, suponen una media del 13,25 % y 7,11 % de la energía y emisiones asociados al hormigón. En el mercado interior estos transportes se realizan predominantemente por carretera.

Para cada proceso de transporte, en la Tabla 2 se indica un rango de consumos y emisiones que es función de la distancia recorrida. Las distancias varían mucho en función del material transportado. Entre la fábrica y el ferrallista el acero recorre habitualmente distancias del orden de 600 km, que pueden llegar a 1.200 km en el mercado interior, o mucho más, si se trata de exportaciones (en este caso por vía marítima). El transporte de la ferralla preparada no suele exceder los 200 km, siendo más probable una distancia del orden de 100 km.

Con respecto al cemento, para su exportación se emplea el transporte marítimo, mientras que en el mercado nacional la distancia más habitual es del orden de 200 km, y la máxima de 400. Los áridos son de producción local, y transportes superiores a 60 km multiplicarían su precio. Los aditivos tienen una influencia muy escasa debido a la pequeña proporción en que se incorporan al hormigón, en general por debajo del 1 %. En este caso se ha considerado una distancia habitual de 150 km y una máxima de 300 km.

El transporte de hormigón fresco está condicionado por el tiempo máximo de permanencia del hormigón en la cuba, que no debe de exceder de 90 minutos. De esta forma, la distancia máxima será la que pueda recorrer una auto-hormigonera en este tiempo, que se estima en unos 60 km. Por otra parte, se considera que la distancia más frecuente es de unos 30 km.

Para el hormigón T3.1 de la Tabla 3 los transportes pueden suponer entre 130,70 y 663,70 MJ/m<sup>3</sup>, y entre 9,43 y

47,60 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Los transportes de cemento, áridos y hormigón fresco son los que más influyen en el total, siendo su importancia similar en los tres casos. El acero, a pesar de ser el material que puede realizar trayectos más largos, tiene menos impacto por suponer un reducido porcentaje en peso en la estructura.

#### 4. COMPARACIÓN ENTRE EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Los aspectos estudiados en el epígrafe 3 aparecen reflejados, en mayor o menor medida, en los criterios medioambientales 1 a 9 de la EHE. Estos criterios pertenecen a los sub-requerimientos «*Tipos de productos básicos*» (criterios  $i = 1,2$  en la Figura 1), «*Optimización de los productos básicos*» ( $i = 3,4,5$ ) y «*Preservación de recursos*» ( $i = 6,7,8$ ). Estos sub-requerimientos forman parte del requerimiento «*Productos*», al que corresponde un 60 % de peso en el ISMA.

##### 4.1. Cemento

En la EHE (Figura 1) el criterio medioambiental de optimización del cemento ( $i = 7$ ) tiene un peso del 22,50 % del requerimiento *Productos*, y del 13,5 % del ISMA en su conjunto. Dicho criterio valora el empleo de adiciones en el cemento, así como la utilización de combustibles alternativos en los hornos de calcinación. La sensibilidad máxima del empleo de adiciones es del 8,64 % (Tabla 1,  $i = 7, k = 4$ ). Alternativamente, en el criterio de optimización del hormigón, las adiciones son valoradas cuando se mezclan directamente con cemento CEM I durante la elaboración del hormigón ( $i = 8$ ; 4,60 % del total del ISMA; 7,65 % del ISMA asignado a los *Productos*). En este caso su sensibilidad es del 5,74 %, tanto para el empleo de cenizas volantes como de humo de sílice. Finalmente, el empleo de combustibles alternativos que minimicen la emisión de CO<sub>2</sub> tiene una sensibilidad máxima del 2,63 % (Tabla 1,  $i = 7, k = 6$ ).

Por su parte, como se ha visto en el epígrafe 3, la importancia en términos ambientales de la producción de cemento es muy elevada: del orden del 60 % del consumo energético total y cerca del 80 % de las emisiones (Tabla 2). Además, en la Tabla 3 se observa que pasar del hormigón tipo T3.1 sin adiciones al tipo T3.2, con aproximadamente un 17 % de cenizas volantes y caliza, supone disminuciones de consumo y emisiones superiores al 12 % y 17 %. Finalmente, en la Tabla 3 se estima una disminución de las emisiones cercana al 12 % para un aporte de biomasa equivalente al 15 % de la energía térmica consumida, a igualdad de cemento CEM I. La utilización conjunta de adiciones y combustible alternativo puede llevar a reducciones muy notables de consumo y emisiones. Por tanto, hay diferencias notables entre la importancia que se da a estos aspectos en la EHE y la que tiene en el ACV realizado.

##### 4.2. Acero

En la EHE, el criterio de optimización del acero ( $i = 4$ ) tiene un peso del 10,89 % del requerimiento *Productos*, y del 6,53 % del ISMA (Figura 1). Este criterio valora el uso de acero reciclado ( $k = 3$ ), siendo del 2,54 % la sensibilidad máxima del parámetro asociado al reciclaje. Se valora también el aprovechamiento de las escorias siderúrgicas ( $k = 5$ ), con una sensibilidad máxima del 1,27 %.

En contraste, la Tabla 3 muestra que el empleo de acero primario en el hormigón tipo T3.4 lleva a grandes incrementos en los niveles de consumo y emisiones, con respecto al uso de acero reciclado. De nuevo, hay diferencias importantes entre la EHE y el ACV aquí realizado.

### 4.3. Distancias de transporte

Los criterios medioambientales de caracterización del hormigón ( $i = 1$ ) y de las armaduras ( $i = 2$ ) tienen cada uno un peso del 11 % del requerimiento *Productos*, y suponen el 6,60 % del ISMA. Tienen en cuenta las distancias de transporte del hormigón preparado y de las armaduras. Cuando el transporte se realiza desde las instalaciones de prefabricación de estructuras y ferralla hasta la obra ( $k = 9$  en ambos criterios), las sensibilidades máximas de estas variables son de 1,43 % y 1,48 %, respectivamente, para hormigón y ferralla. Los demás transportes no influyen de manera significativa en el valor del ISMA. De hecho, el modelo de la EHE sólo tiene en cuenta una parte de los procesos de transporte que intervienen en una estructura de hormigón, que suponen en torno al 13 % del consumo energético total, y al 7 % de las emisiones.

En contraste con lo anterior, en la Tabla 2 se observa que el transporte es la segunda macro-variable en importancia, después de la producción de componentes. A su vez, los transportes de cemento y áridos suponen más del 50 % de la energía y emisiones asociadas al transporte. Concluyendo, las Tablas 1 y 2 muestran que la importancia real del transporte, según el ACV aquí realizado, es superior a la que le otorga la EHE.

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1. Del análisis de sensibilidad

En el epígrafe 2.1.2 de este artículo se han identificado las variables que más influyen en el valor del ICES. La condición medioambiental de los participantes en el proyecto tiene una influencia conjunta en el ICES que resulta a todas luces desproporcionada. A esto hay que sumar que hoy en día una amplia mayoría de empresas están certificadas en calidad y medioambiente y, por tanto, estas puntuaciones van a ser obtenidas sin grandes problemas, independientemente de las características reales de la estructura. La posesión de distintivos de calidad oficialmente reconocidos está también generalizada entre los productores españoles, y tiene una influencia importante sobre el ICES. Existen otros aspectos en los que se dan circunstancias similares, pero que apenas influyen en el ICES; este es el caso de la realización de controles radiológicos en las plantas siderúrgicas, y del sometimiento a las exigencias del Protocolo de Kioto, lo cual se cumple a nivel de países y no de instalaciones concretas. Todas estas variables pueden ser una forma de premiar a los productos de origen nacional o de países del mismo nivel y precios que España, frente a otras importaciones.

En otro orden de cosas, llama la atención que determinados aspectos cuya contribución real a la sostenibilidad es nula o despreciable, tengan una influencia relevante sobre el ICES ( $i = 1, k = 1-3; i = 2, k = 1-3; i = 3, k = 2, i = 8, k = 1$ ; porcentajes de hormigón y de armaduras suministrados por diferentes tipos de empresa; porcentaje de losas armadas con malla electrosoldada o armadura de mallazo soldado; y empleo de cementos tipo CEM I).

El análisis aquí realizado resulta de utilidad para maximizar el ICES respetando las posibles restricciones que se hayan impuesto en el proyecto. Dicha optimización deberá cuidarse durante toda la gestión del proyecto, actuando sobre las variables de mayor efecto sobre el ICES, y poniendo atención sobre los posibles cambios en el proyecto, para evitar que dicho índice descienda. Por otro lado, los fundamentos utilizados en el presente estudio pueden usarse para analizar cualquier otro modelo basado en MIVES, como es el caso del Anejo 11 de la EAE.

### 5.2. Del estudio de consumos de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>

Por su parte, observando las Tablas 2 y 3, resulta evidente que las variables de la Tabla 2 que deberían tener más peso son, por este orden, las relacionadas con los consumos e impactos asociados a la fabricación de cemento (en particular, del clinker), a la producción de acero y a los diversos transportes a realizar. A partir de ello, las variables del modelo de la EHE que mayor importancia deberían tener son:

- El uso de combustibles alternativos o de menor emisión de CO<sub>2</sub> en la producción del cemento ( $i = 7, k = 6$ ).
- El empleo de adiciones en su fabricación ( $i = 7, k = 3$  y 4).
- El uso de cenizas volantes y humo de sílice en la preparación del hormigón ( $i = 8, k = 3$  y 4).
- El empleo de soluciones pretensadas ( $i = 3, k = 1$  y 5), de mayor eficiencia estructural que las de hormigón armado, cuando ello sea lógico.
- El empleo de acero de reciclaje ( $i = 4, k = 3$ ).
- El uso de coeficiente de seguridad reducido para el acero ( $i = 5, k = 2$ ).
- Las distancias de transporte ( $i = 1, k = 8-9; i = 1, k = 8-9$ ). Realmente habría que añadir también otros transportes aquí referidos y no incluidos en la EHE, pero normalmente es difícil estimarlos para un proyecto determinado.

También debería ser una variable de peso la aplicación de un coeficiente de seguridad reducido para el hormigón, que es algo que no cubre la EHE. Como se puede ver en el epígrafe 5.1, las conclusiones aquí vertidas no siempre se corresponden con la influencia de las diversas variables de la Instrucción española.

### 5.3. Conclusiones sobre otros aspectos

Fuera ya del ACV aquí presentado, teniendo en cuenta:

- La definición de sostenibilidad (20), con sus tres pilares equilibrados relativos a lo ambiental, social y económico.
- El hecho de que el consumo de agua sea uno de los aspectos esenciales de la sostenibilidad medioambiental (21).
- Y la evidente importancia de la terna reciclaje-reutilización-revalorización, de la cual se ha visto un ejemplo en este artículo.

Parece lógico que también tengan un peso relevante las variables relacionadas con:

- Las medidas para el ahorro de agua ( $i = 11, k = 2-4$ ).
- El aprovechamiento de las escorias del acero ( $i = 4, k = 5$ ).
- En general, el coeficiente de contribución social ( $a, j = 1-5$ ). Y en particular, determinadas variables sociales de gran importancia no reflejadas en la EHE y que habría que

añadir al modelo. Este es el caso, por ejemplo, de la generación de empleo o la realización de rigurosos análisis de necesidades de la obra, para evitar inversiones innecesarias.

Hay otros aspectos que también deben tener relevancia en cualquier modelo de este tipo, como es la durabilidad, que realmente ya tiene un peso importante a través del criterio de extensión de la vida útil ( $b$ ;  $tg$ ). Lo mismo sucede con el uso de árido reciclado ( $i = 6$ ,  $k = 1$ ).

#### 5.4. Conclusiones finales

El modelo de sostenibilidad que se establezca en próximas versiones normativas debería tener otros pesos y funciones que sirvan para acercarse más a los resultados de un análisis de ciclo de vida. No se trata de se corresponda exactamente

con el ACV, sino de que otorgue suficiente importancia a las variables que realmente la tienen.

Por otro lado, sería recomendable que esas nuevas versiones contemplen el análisis de ciclo de vida como alternativa al modelo simplificado tipo ICES. El ACV complica el trabajo a realizar, ya que lo habitual en España es que la mayoría de técnicos no estén preparados para ello; sin embargo, aumenta el rigor y soluciona algunos de los problemas detectados.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos BIA2010-20789-Co4-02 y o8TMT011166PR, respectivamente financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y la Xunta de Galicia.

#### REFERENCIAS

- (1) Ministerio de la Presidencia (2008). Real Decreto 1247/2008 de 18 de julio, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). *Boletín Oficial del Estado*, nº 203. España.
- (2) Aguado, A., del Caño, A., de la Cruz, M.P., Gómez, D., Josa, A. (2012). Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code. *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 138(2): 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).
- (3) Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, M.P., Josa, A. (2012). Metodología genérica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos. El método MIVES. En Aguado, A. (Ed): *Sostenibilidad y construcción* (pp. 385-411; Cap. 18). Madrid: Asociación Científico-Técnica del Hormigón (ACHE).
- (4) Alarcón, B. Aguado A., Manga R., Josa A. (2011) A Value Function for Assessing Sustainability: Application to Industrial Buildings. *Sustainability*, 3(1): 35-50, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su3010035>.
- (5) Bilec, M.M., Ries, R.J., Matthews, H.S. (2010). Life-Cycle Assessment Modeling of Construction Processes for Buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, 16(3): 199-205, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000022](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000022).
- (6) AlWaer, H., Kirk, D. (2012). Building sustainability assessment methods. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 165(4): 241-253, doi: <http://dx.doi.org/10.1680/ensu.10.00058>.
- (7) Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 26: 379-388, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>.
- (8) Mathews, J.H. (1992). *Numerical methods for mathematics science, and engineering*. Englewood Cliffs, New Jersey, NJ, USA: Prentice Hall.
- (9) Goedkoop, M., Hofstetter, P., Müller-Wenk, R., Spriensma, R. (1998). The Eco-Indicator 98 explained. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 3(6): 352-360, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02979347>.
- (10) Flower, D., Sanjayan, J. (2007). Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. *International Journal on Life Cycle Assessment*, 12(5): 282-288, doi: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2007.05.327>.
- (11) Pérez, P., Monzón, A. (2008). Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión. *Observatorio Medioambiental*, 11: 127-147.
- (12) Eriksson, E., Blinge, M., Lovgren, G. (1996). Life cycle assessment of the road transport sector. *The Science of Total Environment*, 189-190: 69-76, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05192-3](http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697(96)05192-3).
- (13) Hammond, G., Jones, C. (2013). Inventory of carbon and energy (ICE) Version 2.0. [www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied](http://www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied). Sustainable Energy Research Team. Dept. of Mechanical Engineering-University of Bath.
- (14) Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M. P. (2013). Análisis del consumo energético y de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la construcción de estructuras de hormigón en España. *Dyna*, 88(1): 59-67, doi: <http://dx.doi.org/10.6036/5078>.
- (15) Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M. P. (2014a, 16-18 de julio). Sostenibilidad en la fabricación de cemento en España: análisis del consumo energético y de las emisiones de CO<sub>2</sub>. En *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 02-001-1/16). Alcañiz (España).
- (16) Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M. P. (2014b, 16-18 de julio). Sostenibilidad en la producción de árido granítico en el noroeste de España: consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>. En *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 02-002-1/12). Alcañiz (España).
- (17) Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M. P. (2014c, 16-18 de julio). Sostenibilidad en la fabricación de armaduras de acero en España: análisis del consumo energético y de las emisiones de CO<sub>2</sub>. En *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 02-003-1/9). Alcañiz (Spain).
- (18) Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M. P. (2014d, 16-18 de julio). Sostenibilidad en la preparación y puesta en obra de hormigón en España: análisis de consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>. En *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 02-004-1/12). Alcañiz (Spain).

- (19) Comisión Europea. (2007, 31 de agosto). 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 de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. *Diario Oficial de la Unión Europea*, documento L 229. Bruselas.
- (20) United Nations Organization. (1992). Rio Declaration on Environment and Development. En *United Nations Conference on Environment and Development (UNCED)*. Río de Janeiro, Brasil: United Nations Organization.
- (21) UNESCO. (2014). UN Water. Web page on water cooperation. Sub-page related to facts and figures. <http://www.unwater.org/water-cooperation-2013/water-cooperation/facts-and-figures/en/>.

\* \* \*