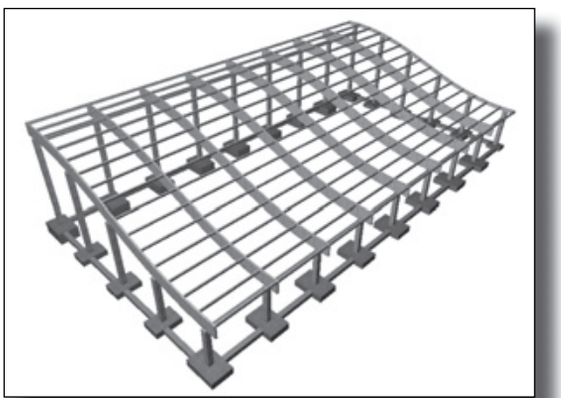
Herramienta de cálculo para la evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón según la instrucción Española EHE-08



Diego Gómez-López — Ingeniero Industrial
M. Pilar de la Cruz-López — Dr. Ingeniero Industrial
Alfredo del Caño-Gochi — Dr. Ingeniero Industrial
Ignacio Arroyo-Cunha — Ingeniero Industrial

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

Recibido: 26/09/2011 • Aceptado: 06/02/2012
DOI: http://dx.doi.org/10.6036/4391

COMPUTER TOOL FOR ASSESSING SUSTAINABILITY OF CONCRETE STRUCTURES ACCORDING TO THE SPANISH EHE-08 CODE

ABSTRACT

• The Spanish Structural Concrete Code (EHE, in Spanish) includes, in its Appendix 13, a model for assessing structural sustainability. This model is based in the MIVES method (Integrated Value-based Model for Sustainability Assessment, in Spanish), and includes the evaluation of different environmental, social and economic indicators, related to the structure design and construction.
According to the EHE, when a sustainable structure is designed, it is necessary to estimate the EHE sustainability index at least two times: after finishing the design and when the construction has been completed. On the other hand, performing additional estimations in other moments of the project life-cycle is inevitable.
During the design stages this will serve to make decisions in order to obtain a design matching the sustainability objective established by the client. The subsequent assessments performed during the procurement and construction stages will serve for monitoring and controlling purposes; this will allow increasing the likelihood of achieving the referred to objective. Despite the corresponding calculations are not excessively complex, they are long and a little tedious. So it is necessary to have a tool to save time and streamline the estimating process, facilitating and speeding up the decision-making process. This article presents a free of charge computer tool for this purpose, in order to encourage the design of sustainable structures. On the other hand, the paper also summarizes the foundations of the EHE sustainability assessment model, to clarify the method and the calculations to be performed.
• Keywords: concrete structures, sustainability, assessment, estimating, standards and codes, software.

RESUMEN

La actual *Instrucción de hormigón estructural* (EHE) incluye, en su Anejo 13, un modelo para evaluar la sostenibilidad estructural. Dicho modelo se basa en el método MIVES (*Método Integrado de Valor para Evaluaciones de la Sostenibilidad*), e integra la evaluación de diversos aspectos medioambientales, sociales y económicos, relacionados con el proyecto y la ejecución de la estructura.

Si se proyecta una estructura con arreglo a criterios de sostenibilidad, la EHE establece la necesidad de calcular el correspondiente índice de sostenibilidad tanto al finalizar el proyecto facultativo como al terminar la obra. Por otro lado, resulta inevitable realizar estimaciones adicionales de dicho índice, en otros momentos del ciclo de vida del proyecto. Unas se llevarán a cabo, mientras se desarrolla el proyecto constructivo, y servirán para tomar las decisiones que permitan proyectar una estructura acorde con el objetivo de sostenibilidad establecido por el cliente. Las posteriores a la redacción del proyecto servirán para realizar el seguimiento y control de dicho objetivo durante las fases de contratación y ejecución: esto permitirá aumentar las posibilidades de cumplirlo. Aunque no revisten excesiva complejidad, los cálculos a realizar son largos y algo tediosos. Todo lo anterior implica la necesidad de disponer de una herramienta que ahorre tiempo y agilice la realización de dichas

estimaciones, facilitando la toma de decisiones. En este artículo se presenta una herramienta informática de cálculo, de uso gratuito, cuyo objeto es hacer más fácil y cómoda la aplicación de la Instrucción y fomentar, con ello, el proyecto sostenible de estructuras de hormigón. Por otro lado, se resumen aquí los fundamentos en los cuales se basa el modelo de evaluación del Anejo, con objeto de que el lector pueda llegar a una mejor comprensión de los cálculos que realiza.

Palabras clave: hormigón estructural, sostenibilidad, evaluación, estimaciones, normativa, software.

1. INTRODUCCIÓN OBJETO. ASPECTOS METODOLÓGICOS.

La Instrucción española de hormigón estructural (EHE; España-Ministerio de la Presidencia, 2008) incluye un planteamiento general de sostenibilidad para el conjunto de la propia Instrucción (Rodríguez, 2008). Dicho planteamiento tiene su culminación en el Anejo 13 de la Instrucción, dedicado a la evaluación de la sostenibilidad de la estructura. Los autores, dos de los cuales han colaborado en la redacción del Anejo, están participando actualmente en dos proyectos de investigación (Gómez et al., 2010) en los que, como punto de partida, han procedido a analizar en detalle el Anejo y a aplicarlo a proyectos diversos. Con objeto de ahorrar tiempo de cálculo se decidió elaborar una sencilla herramienta informática de ayuda. Al cabo de cierto tiempo, responsables del Ministerio de Fomento se pusieron en contacto con los autores para ver la posibilidad de que dicho organismo pudiera ofrecer la herramienta referida a los potenciales usuarios, por medio de su Web.

La versión preliminar que habían desarrollado los autores era completamente austera, no resultaba amigable y por ello no era adecuada a las expectativas de un usuario normal. Se procedió a realizar desarrollos incrementales sucesivos, con las correspondientes pruebas de funcionamiento, hasta llegar a una herramienta suficientemente amigable. Tras ello se ha realizado, por parte de los autores, una última fase de pruebas parciales y, de conjunto, incluyendo la evaluación de diversos casos prácticos. Finalmente, se ha recurrido a diversas personas ajenas al equipo de desarrollo, que han usado la aplicación tanto en casos hipotéticos como en casos reales.

Con respecto a la elección de una plantilla de libro electrónico como soporte de la herramienta, ésta se ha debido a diversas razones. En primer lugar, los proyectos en el marco de los cuales se ha realizado este trabajo no incluían en su alcance la realización de una aplicación amigable, completa y de uso sencillo, sino una herramienta de bajo coste, para el mero uso interno. La diferencia de costes de desarrollo entre ambos tipos de aplicación es muy importante. En otro orden de cosas, la herramienta debía suministrarse sin coste alguno para el Ministerio. Finalmente, hay que tener en cuenta que la herramienta preliminar era un libro electrónico, debido a las necesidades de facilidad y rapidez de modificación requerida para los trabajos que están realizando los autores, que tienen que ver con la identificación e implantación de mejoras al Anejo de la EHE, con vistas a futuras ediciones de la Instrucción. Al margen de lo anterior también se ha valorado, por un lado, la facilidad que aporta este tipo de herramientas para que el usuario incorpore fácilmente datos de sus mediciones, cuando éstas se realizan mediante hojas electrónicas. Por otro, en comparación con aplicaciones de tipo "cerrado", este soporte supone una mayor flexibilidad para que potenciales usuarios, más o menos convencionales, realicen mejoras o adaptaciones de la herramienta a sus necesidades.

2. EL MÉTODO MIVES Y SU APLICACIÓN A LA EHE

El método MIVES (*Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones de la Sostenibilidad*) es una combinación de técnicas que se basa en el análisis de valor (Gómez et al., en prensa a) y tiene en cuenta la importancia relativa de los diferentes aspectos que se incluyen en la evaluación. Por ello puede ser de gran utilidad para comparar diferentes alternativas de proyecto y escoger aquella que mejor contribuya a un desarrollo más sostenible.

El desarrollo sostenible es una disciplina joven, y por ello hasta la fecha no existe investigación suficiente como para poder establecer rigurosos modelos globales de evaluación cuantitativa de la sostenibilidad de conjunto de una construcción (del Caño y de la Cruz, 2008). No obstante, existen organizaciones que han establecido modelos simplificados para el conjunto del edificio (Losada et al., 2006; San José y Garrucho, 2010), frecuentemente basados en sistemas de puntuaciones ponderadas, existiendo investigación en curso para el uso de otras técnicas más sofisticadas (Gómez et al., en prensa a). En una de estas últimas líneas se enmarca el método MIVES, que constituye la base del Anejo. MIVES (Losada et al., 2006; San José y Garrucho, 2010; Gómez et al., en prensa a) se puede aplicar a cualquier sistema constructivo (no sólo al estructural), y tiene siete etapas o pasos que consisten en:

A. Definir el problema a resolver y las decisiones que hay que tomar. Aquí, proyectar estructuras más sostenibles.
B. Elaborar un esquema del modelo que se va a construir, en la forma de un árbol de requerimientos como el de la Figura 1, que normalmente tiene tres niveles. En la EHE esos niveles se llaman requerimientos, sub-requerimientos y criterios. Estos últimos pueden ser, a su vez, cualitativos o cuantitativos.
C. Establecer funciones matemáticas, llamadas funciones de valor, que permitan convertir las variables cualitativas y cuantitativas en un conjunto de variables que tiene la misma unidad y escala.

D. Definir la importancia o peso relativo de cada uno de los aspectos que se van a tener en cuenta en la evaluación. En la Figura 1 se muestran los pesos α_i, β_i y γ_i de cada una de las ramas del árbol de requerimientos antes referido. Para definir estos pesos se pueden usar valores numéricos establecidos por expertos en la materia. No obstante, en caso de árboles de cierta complejidad, o de discrepancias entre dichos expertos o, simplemente, cuando se desee realizar un proceso ordenado para evitar dificultades al establecer dichos pesos, se puede utilizar el Proceso Analítico de Priorización (Gómez et al., en prensa a), junto con un proceso posterior de análisis, contraste y, si ha lugar, modificación de los pesos resultantes.

E. Definir las diferentes alternativas de proyecto que pueden servir para resolver el problema previamente identificado.

F. Evaluar dichas alternativas, por medio del modelo creado previamente. En este caso, calcular el índice de sostenibilidad de cada una de ellas.

G. Tomar las decisiones oportunas, eligiendo la alternativa de proyecto más adecuada.

Este método también sirve para realizar una mera evaluación de una determinada estructura existente o futura, a efectos de su contribución al desarrollo sostenible. Por otro lado, en el Anejo las fases A a D han sido realizadas por el grupo de trabajo que ha redactado dichos documentos, y las fases E a G son las que realiza el proyectista, con su cliente, durante el proyecto de construcción.

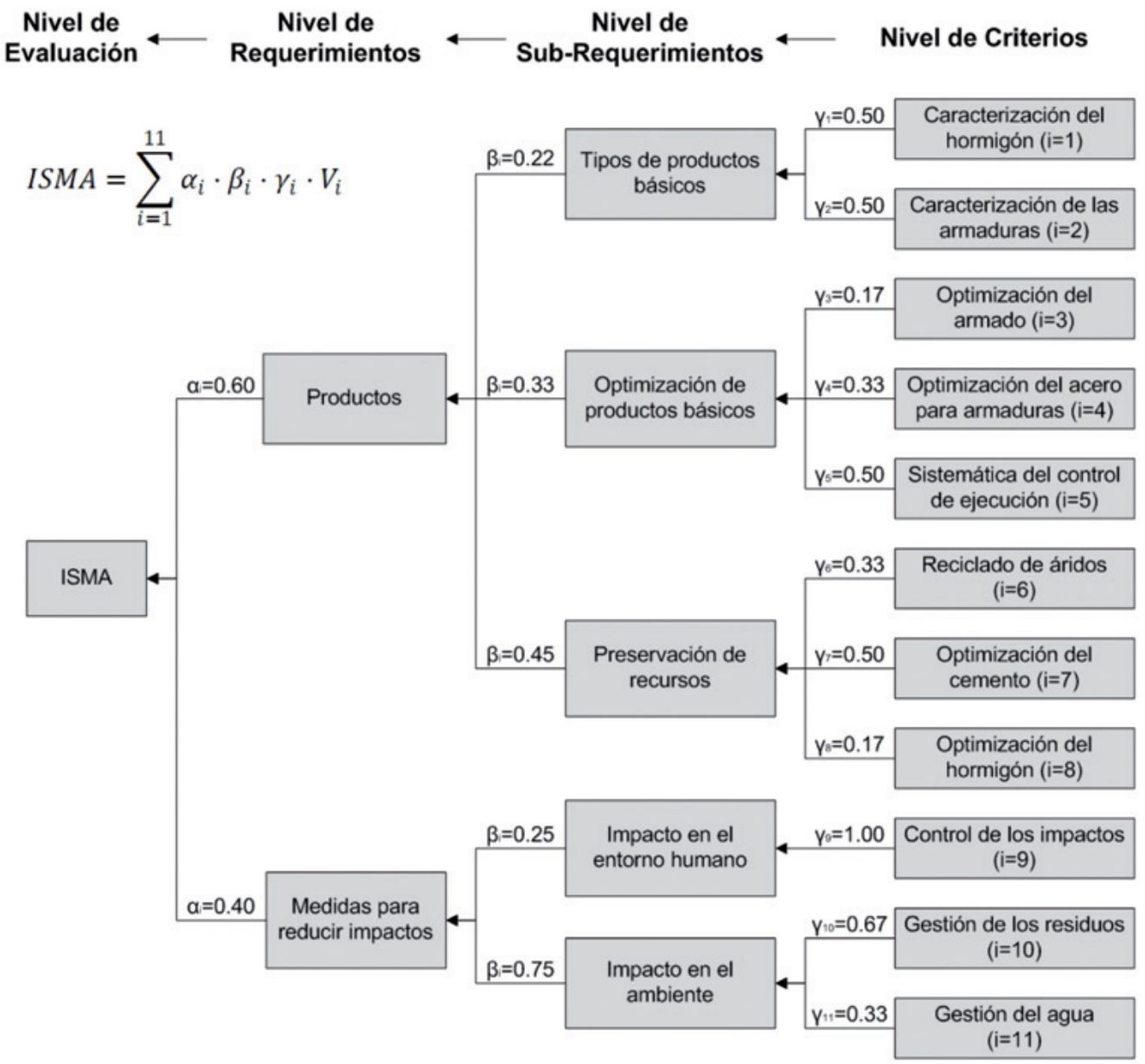


Figura 1: Árbol de requerimientos medioambientales del Anejo, con sus correspondientes pesos α_i, β_i y γ_i.

Con respecto al modelo de evaluación, éste está basado en la teoría general de toma de decisiones, en particular, en los métodos multicriterio y, más concretamente, en la *Teoría de la Utilidad Multiatributo (Multi-Attribute Utility Theory*: MAUT), constituyendo una metodología de conversión de las diferentes magnitudes y unidades de los criterios en una unidad común, adimensional, que denominaremos "valor" (fase C de MIVES). A partir de ahora vamos a referir las fórmulas usadas en la EHE, sin incluir el desarrollo matemático que conduce a ellas; el lector interesado puede encontrar dicho desarrollo en Gómez et al. (en prensa a y en prensa b).

En la EHE se ha usado MIVES para calcular un valor numérico representativo del grado de sostenibilidad medioambiental de una estructura de hormigón. Dicho valor se ha llamado "*Índice de Sensibilidad Medioambiental*" (ISMA), y representa el valor que integra a todas las funciones de valor de los once criterios recogidos en la Figura 1. La fórmula para calcular el ISMA de una estructura se corresponde con la expresión [1], en la cual (véase la Figura 1), i es el índice correspondiente al ordinal del criterio medioambiental de que se trate, α_i y β_i son los pesos de los requerimientos y sub-requerimientos a los que pertenece cada criterio i-ésimo, γ_i son los pesos de los diferentes criterios, y V_i es la función de valor correspondiente al criterio medioambiental i-ésimo.

$$ISMA = \sum_{i=1}^{11} \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i \qquad [1]$$

Las funciones V_i asociadas a los once criterios sirven para homogeneizar las unidades de los criterios, siendo recomendable delimitar los valores que pueden devolver estas funciones. Con esto se logra que todos los criterios se encuentren referidos a una misma escala de valoración, normalmente entre cero y uno, valores asociados al mínimo y máximo grado de sostenibilidad, respectivamente. Con ello se facilita, por un lado, la ponderación de las funciones V_i mediante los pesos α_i, β_i, y γ_i. Por otro, también será más sencilla la obtención de estos pesos (α_i, β_i, y γ_i), ya que sólo será necesario establecer la prioridad relativa de unos requerimientos, sub-requerimientos o criterios respecto a otros, sin atender a que algunos puedan presentar escalas de cuantificación diferentes.

Para poder limitar la escala de las funciones de valor es necesario determinar cuáles son los valores $P_{i,min}$ y $P_{i,max}$ asociados al mínimo y máximo grado de sostenibilidad en cada criterio; es decir, los valores de P asociados a los valores 0 y 1 de V_i. Se denomina puntos de mínima y máxima satisfacción a estos valores.

El otro aspecto importante de las funciones de valor es su forma o geometría. La utilización de una u otra forma depende de las características del criterio a evaluar (Alarcón et al., 2011) y del objetivo que se pretenda obtener con ello. Así, por ejemplo, las funciones convexas experimentan un gran aumento de valor para respuestas cercanas a la que genera el mínimo valor, disminuyendo el incremento de valor a medida que la respuesta se acerca a la que genera el máximo. Este tipo de función, de baja exigencia, se utiliza cuando se quiere incentivar el cumplimiento de unos requisitos mínimos. Este ha sido el caso, por ejemplo, del criterio medioambiental de reciclado de áridos. El caso contrario es el de las funciones cóncavas, de alta exigencia, con las que se busca llevar al proyectista a puntos cercanos al de máxima satisfacción. Al ser la sostenibilidad algo novedoso, no se ha juzgado oportuno, por el momento, usar este tipo de función en la EHE. Por su parte, en la función con forma de S el mayor incremento de valor se produce en la parte central del rango de respuestas. Esta función se emplea en aquellos criterios donde se considera que lo apropiado debería ser que se alcanzase una respuesta media. Este ha sido el caso de algunos de los criterios medioambientales, como el de gestión del agua. Finalmente, en la función recta el incremento de valor es constante a lo largo del rango de posibles respuestas. Esta función se usa cuando no se tienen razones especiales que apoyen el uso de las anteriores, y ha sido usada en varios criterios de la EHE, como es el caso del de control de los impactos.

Las funciones de valor de los criterios del Anejo siguen la expresión [2]. En ella, el parámetro P_i es el valor o puntuación cuantificable de cada uno de los criterios medioambientales. Por su parte, los valores de los parámetros K_i, m_i, n_i y A_i, incluidos en la Tabla A.13.4.1.b del Anejo, son los que limitan el valor de la función entre 0 y 1 y dan forma a dicha función: cóncava, convexa, recta, o en forma de S, así como el grado de concavidad o convexidad y la ubicación del punto de inflexión de las curvas en S. Para más detalle sobre estos parámetros, véase Gómez et al. (en prensa a) y Alarcón et al. (2011).

$$V_i = K_i \cdot \left[1 - e^{m_i \left(\frac{P_i}{n_i}\right)^{A_i}}\right] \qquad [2]$$

En el caso de la EHE el grupo de trabajo decidió dar a cada función de valor la forma que a su juicio reflejaba mejor su contribución a la sostenibilidad medioambiental, en lo referente a cada criterio. Tras ello se realizó un análisis matemático para determinar los valores que debían tener los parámetros K_i, m_i, n_i y A_i con objeto de que cada función de valor tuviese la forma deseada.

Una de las dificultades que surgió en la aplicación de MIVES al Anejo es que, al evaluar los criterios de acuerdo con dicho método, la respuesta P_i de cada uno de ellos debe ser cuantificable y, sin embargo, cada uno de los criterios de la Figura 1 puede incluir varios aspectos a evaluar, algunos de los cuales pueden ser cuantitativos, y otros no; dicho de otra manera, existiría un cuarto nivel de desagregación que no se ha incluido en la Figura 1, con objeto de que esta figura pueda caber en una publicación de este tipo.

En la Tabla 1 se resume este cuarto nivel de desagregación, incluyendo todos los aspectos evaluables en los cuales se

desglosa cada uno de los once criterios medioambientales. Para cada aspecto a evaluar se incluye entre paréntesis, si ha lugar, las alternativas de proyecto o ejecución, ordenadas de mayor a menor puntuación a efectos de su sostenibilidad. En el caso particular de las distancias de transporte, una menor distancia supone una mayor puntuación. Finalmente, cuando se trata de aspectos evaluados en función de un porcentaje, la puntuación aumenta con el aumento de dicho porcentaje.

La solución que se articuló para esta parte del problema consiste en establecer un sistema de puntuación específico para cada criterio, que cuantifique el grado de cumplimiento de todos esos aspectos cualitativos y cuantitativos a evaluar en el cuarto nivel de desglose, devolviendo un solo valor P_i para su introducción en la correspondiente función de valor. Este sistema de puntuación utiliza lo que el Anejo denomina funciones representativas, definidas en el epígrafe 4.3 del mismo, que otorgan una puntuación entre 0 y un valor máximo de P_i ($P_{i,max}$) mediante el uso de diversas tablas que recogen las puntuaciones de las posibles soluciones a adoptar.

Lógicamente, 0 ($P_{i,min} = 0$) y $P_{i,max}$ son las puntuaciones asociadas a los niveles de mínima y máxima sostenibilidad medioambiental de cada criterio, y que por tanto devolverán los valores 0 y 1, respectivamente, al ser evaluadas con las funciones de valor.

Tras usar las diferentes fórmulas representativas de cada uno de los once criterios, habiéndose obtenido con ello el valor asociado a cada aspecto incluido en la Tabla 1, se usa la expresión [1] para obtener el ISMA. Falta ahora tener en cuenta los aspectos económicos y sociales, con objeto de obtener un valor de conjunto asociado a la sostenibilidad de la estructura, es decir, al Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES), para cuyo cálculo se ha establecido la expresión [3].

$$ICES = a + b \cdot ISMA \qquad [3]$$

con las siguientes restricciones:

$$ICES \leq 1$$

$$ICES \leq 2 \cdot ISMA$$

En la expresión [3], *a* es el coeficiente asociado a la contribución social. A continuación se indican los aspectos que se valoran a estos efectos. Nótese que, al igual que cuando se referían los aspectos evaluados a efectos del ISMA, a continuación del aspecto social evaluado se incluyen las alternativas que prevé el anejo, en orden decreciente de puntuación a efectos del ICES.

- Aplicación de métodos innovadores de ejecución derivados de proyectos de I+D+i (si, no).
- Formación del personal de obra más allá de lo establecido en la legislación y normativa (si, no).
- Adopción de medidas voluntarias de seguridad y salud que vayan más allá de las reglamentarias (si, no).
- Establecimiento de medios que sirvan para informar al ciudadano de las características, plazos de ejecución, e implicaciones económicas y sociales de la obra (si, no).
- Obra declarada de interés general por la Administración Pública competente (si, no).

Por su parte, los aspectos económicos se tienen en cuenta de una manera simplificada, mediante el coeficiente *b* de la expresión [3], que aumenta al incrementarse la durabilidad de la estructura. Se entiende que, cuando una estructura es proyectada y ejecutada para que tenga una vida útil superior a la mínima exigida por la normativa vigente, ello supone una ventaja económica, ya que el plazo para amortizar la inversión realizada es mayor y, por tanto, crece la rentabilidad económica o social de dicha inversión. Debe tenerse en cuenta, por un lado, que otros aspectos que influyen en la economía de la solución estructural ya se han tenido en cuenta antes, en los criterios medioambientales (por ejemplo, el ahorro de materiales); por otro lado (del Caño y de la Cruz, 2008; Aguado et al., 2011; Gómez et al., en prensa b), hay otros aspectos que influyen en la economía de costes que no han sido tenidos en cuenta por problemas diversos. En otro orden de cosas, hay una componente medioambiental en el criterio de extensión de la vida útil, ya que si la durabilidad aumenta, se tarda más tiempo en volver a agredir al medio ambiente para construir una nueva.

El cálculo del coeficiente *b* se realiza mediante el uso de la expresión [4], dividiendo la vida útil (t_g) con arreglo a la cual se ha proyectado y ejecutado la obra, entre la vida útil mínima exigida por la instrucción ($t_{g,min}$) en la Tabla 5.1 de su Art. 5. Se ha limitado este coeficiente a 1.25 con el objetivo de impedir que se logren altos valores del ICES por extensiones importantes de la vida útil de estructuras que no tengan buenas valoraciones en los aspectos medioambientales y sociales, teniendo en cuenta que la EHE ya es bastante exigente en materia de durabilidad.

$$b = \frac{t_g}{t_{g,\min}} \leq 1.25 \qquad [4]$$

Para mayor facilidad de uso, la EHE establece una escala de niveles de sostenibilidad, parecida a la que se usa para comparar los consumos energéticos en los aparatos electrodomésticos (A, B, C, D o E; véase el epígrafe 5 del Anejo).

3. HERRAMIENTA INFORMÁTICA DE CÁLCULO

Con objeto de ahorrar tiempo de cálculo, agilizar las estimaciones, hacer más cómodo el proceso de cálculo y facilitar la toma de decisiones, tres de los autores han desarrollado la aplicación informática denominada MIVES-EHE-08-V01.05-VMFom (en adelante, MIVES-EHE), de uso gratuito, que puede descargarse en España-Ministerio de Fomento (2011) y en GRIDP (2011). De acuerdo con los

Criterio Medioambiental	Aspectos evaluados
Caracterización del hormigón	1. Procedencia del hormigón (instalación de prefabricación, instalación ajena a la obra, instalación de obra). 2. Certificación medioambiental de las empresas suministradoras de hormigón (distintivo, compromiso, otros casos). 3. Certificación medioambiental de la empresa constructora (distintivo, compromiso, otros casos). 4. Distancia de transporte del hormigón a la obra.
Caracterización de las armaduras	5. Procedencia de la ferralla (instalación de prefabricación, instalación ajena a la obra, instalación de obra). 6. Certificación medioambiental de la empresa de ferralla (distintivo, compromiso, otros casos). 7. Certificación medioambiental de la empresa constructora (distintivo, compromiso, otros casos). 8. Distancia de transporte de la ferralla a la obra.
Optimización del armado	9. Tipo de hormigón (pretensado, armado). 10. Porcentaje de losas armadas con malla electrosoldada o armadura de mallazo soldado. 11. Sistema de unión utilizado (medios mecánicos, soldadura). 12. Porcentaje de armaduras elaboradas con formas según UNE 36.831.
Optimización del acero para armaduras	13. Certificación medioambiental de la producción del acero (EMAS, ISO, ninguna). 14. Porcentaje de acero con distintivo de calidad. 15. Acero con distintivo de calidad certificando que al menos el 80% de la producción procede del reciclado de chatarra (si/no). 16. Acero con distintivo de calidad certificando una producción de acero sometida a las exigencias del Protocolo de Kyoto (si/no). 17. Acero con distintivo de calidad certificando que se realiza un aprovechamiento de escorias superior al 50% (si/no). 18. Materias primas y acero sometido a controles de emisión radiológicos (si/no).
Control de la ejecución	19. Utilización de elementos de hormigón con distintivo de calidad (si/no). 20. Aplicación de coeficiente de seguridad disminuido para el acero, de acuerdo la EHE (si/no).
Árido reciclado	21. Porcentaje de áridos reciclados usados en la producción del hormigón.
Optimización del cemento	22. Porcentaje de hormigón con distintivo de calidad y adiciones. 23. Certificación medioambiental de la producción de cemento (EMAS, ISO, ninguna). 24. Distintivo de calidad del cemento que certifique que contiene un porcentaje de adiciones igual o menor al 20% (si/no). 25. Distintivo de calidad del cemento que certifique que contiene un porcentaje de adiciones mayor al 20% (si/no). 26. Distintivo de calidad certificando una producción de cemento sometida a las exigencias del Protocolo de Kyoto (si/no). 27. Distintivo de calidad certificando que en la producción de cemento se emplean combustibles y materias primas que producen menos emisiones de CO_2 (si/no).
Optimización del hormigón	28. Empleo de cementos tipo CEM I (si/no) 29. Certificación medioambiental de las empresas suministradoras de hormigón (si/no). 30. Porcentaje de adición de cenizas volantes en la composición del hormigón. 31. Porcentaje de adición de humo de sílice en la composición del hormigón.
Control de los impactos	32. Empleo de aspersores en la obra para evitar el polvo (si/no). 33. Pavimentación de los accesos a la obra o uso de sistemas de limpieza de neumáticos (si/no). 34. Utilización de pantallas u otros dispositivos de retención de polvo (si/no). 35. Empleo de estabilizantes químicos para reducir la producción de polvo (si/no). 36. Utilización de toldos y lonas para la cobertura del material expuesto a la intemperie, incluido su transporte (si/no).
Gestión de los residuos	37. Gestión de los productos de excavación (reciclaje, vertedero, sin planificar). 38. Gestión de los residuos de construcción y demolición (reciclaje, vertedero, sin planificar). 39. Porcentaje de hormigón con distintivo de calidad. 40. Porcentaje de probetas cúbicas usadas en el control de calidad del hormigón.
Gestión del agua	41. Certificación medioambiental de la empresa constructora (distintivo, compromiso, otros casos). 42. Técnicas de curado eficiente con relación al consumo de agua (si/no). 43. Uso de dispositivos de ahorro de agua (si/no). 44. Uso de contenedores para la recogida y uso de agua de lluvia (si/no).

Tabla 1: Aspectos evaluados en cada criterio medioambiental

requisitos establecidos por el Ministerio, esta herramienta sigue fielmente el articulado de la EHE, por cuanto dicho organismo no puede ofrecer al público aplicaciones que no cumplan dicha condición. Esto ha supuesto la inclusión de alguna pequeña errata existente en el texto normativo, que no supone diferencias relevantes en los resultados del cálculo.

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES. INTRODUCCIÓN DE DATOS

La aplicación consiste en una plantilla de libro electrónico (archivo XLT), en principio compatible con versiones de Microsoft Excel posteriores a la 97. Para su uso, el usuario debe estar familiarizado con el Anejo y con los conceptos de la EHE relacionados con el mismo. El archivo incluye una hoja de instrucciones, junto con otras quince hojas de cálculo. La primera de ellas (Portada) tiene como misión recoger los datos descriptivos del proyecto y de la evaluación que se va a llevar a cabo, para su uso como portada. En la segunda (Resultados) se incluye un resumen de todos los cálculos realizados. Las restantes hojas son de introducción de datos, y en ellas se deben introducir los valores de las diferentes variables del Anejo. Algunos valores están pre-programados de acuerdo con los posibles valores que puede tomar la variable, de forma que el usuario sólo tiene que escoger la opción oportuna de la correspondiente lista desplegable. Para mayor claridad y comodidad de uso, en este tipo de listas las opciones a escoger están ordenadas de mayor a menor impacto positivo sobre el ICES. Es decir, cuanto más arriba se encuentra una opción en dichas listas, más aumenta el ISMA o, en general, el ICES.

3.2. CÁLCULOS. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los cálculos se realizan de manera automática conforme se van introduciendo datos. Aun así, en cada una de las hojas de introducción de datos se muestran también los valores que toman el ISMA y el ICES de ejecución, que es el que se prevé como definitivo. Con todo ello, el usuario puede ver cómo varían ambos índices conforme se van introduciendo los datos de la estructura. El valor del ISMA comienza a variar desde el momento en que empiezan a introducirse valores, pero el valor del ICES, debido a su fórmula, será nulo hasta que se comiencen a introducir los datos relativos a la contribución por extensión de la vida útil (véanse las fórmulas del ISMA y del ICES recogidas con anterioridad).

La herramienta permite realizar un sencillo análisis de sensibilidad. Si bien parte de esa sensibilidad puede detectarse mientras se están introduciendo los datos, la utilidad máxima se obtiene tras la introducción de todos los datos base de la estructura; es decir, los que el autor del proyecto ha establecido que se deben respetar más los que, no habiendo sido impuestos, o no pudiendo anticiparse de manera cierta, resultan realistas para las condiciones estimadas en las cuales se va a desarrollar la obra. Tras ello el usuario puede ir a cada hoja de introducción de datos y hacer modificaciones en los datos de entrada, observando de inmediato en dicha hoja cómo varían los índices de sostenibilidad, identificando qué puede hacer que el ICES aumente o disminuya, y obteniendo información que le permita comparar también, por ejemplo, las consecuencias que tiene conseguir un mismo aumento del ICES de diferentes maneras (en plazo o costes, entre otras). Para estimar dichas consecuencias se requiere tener cierta experiencia en el campo de las estructuras de hormigón. Todo lo anterior no impide el uso de otras funciones más avanzadas de Excel, que permiten realizar análisis de sensibilidad más complejos y completos.

Debido a la incertidumbre que rodea a todo proyecto, este análisis de sensibilidad ayuda a la toma de decisiones sobre los objetivos perseguidos en dicho proyecto. En todo caso, se recomienda que el ICES de proyecto sea un tanto superior al ICES objetivo que plantea el cliente, ya que los inevitables cambios durante la contratación y la obra pueden ir en contra de la consecución del objetivo de sostenibilidad.

3.3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Este ejemplo de aplicación está relacionado con un edificio industrial ubicado en **Narón**, provincia de La Coruña. Se trata de un edificio proyectado con arreglo a criterios de sostenibilidad, concebido por dos de los autores y proyectado por uno de ellos. En las Figuras 2 a 4 se muestran, respectivamente, las fachadas testeras y laterales, y la planta de cubierta. Esta última está proyectada para soportar placas solares térmicas y fotovoltaicas (Figura 4). El edificio acoge tanto zonas de proceso como de oficinas y servicios para el personal. La nave tiene unas dimensiones aproximadas de 20 x 40 m. La estructura de cubierta (Figura 5) está constituida por dinteles curvos y correas convencionales de madera laminada encolada, con certificado FSC (*Forest Stewardship Council*) de procedencia de bosques explotados de manera sostenible. Debido a la baja eficiencia estructural a compresión de la madera, así como a los problemas de durabilidad que supone su empotramiento en otros materiales, se ha optado por proyectar soportes de hormigón armado. Por razones obvias, el arriostramiento de cubierta está compuesto por cruces de San Andrés de varilla metálica y el resto de la estructura (cimentaciones y entramados contraviento de fachada) es de hormigón armado. Se proyecta el uso de hormigón HRA-40 en pilares y vigas de los entramados contraviento laterales (aprox. 27,5 m^3), HRA-25 en cimentaciones (aprox. 254,4 m^3) y HRM-20 para uso como hormigón de limpieza (aprox. 12,9 m^3). El acero es B 500 S en todos los casos (aprox. 16.043 Kg).

Los datos correspondientes a los diferentes aspectos a evaluar para el cálculo del ISMA se han determinado mediante un análisis del sector local y se corresponden con una selección que los autores han realizado de diversos suministradores de la zona y de productos comerciales que se pueden encontrar a la venta en los alrededores, tras haber contactado con diversas empresas y haber recopilado los oportunos datos necesarios para la evaluación del ICES. Dichos datos, correspondientes con los diferentes códigos numéricos de la Tabla 1, son los siguientes:

- (1) 100% de central ajena a la obra.
- (2, 3, 7, 23, 41) ISO 14001.
- (4) 4 Km.
- (5) 100% de empresa de ferralla ajena a la obra.
- (6) Compromiso medioambiental.
- (8) 109 Km.
- (9) 100% hormigón armado.
- (10) 100% (solera).
- (11) 73% con medios mecánicos.
- (12, 14) 100%.
- (13) Ninguna.
- (15, 17, 24, 28, 34, 35) No.
- (16, 18, 25, 26, 27, 29, 32, 33, 36, 42, 43, 44) Sí.
- (21) 20%.
- (19, 20, 22, 30, 31, 39, 40) 0%.
- (37) 100% reutilización.
- (38) El 60% se recicla.

Con respecto al criterio de contribución social, en éste solo se cumplen los requisitos relacionados con la elaboración de una página Web de la obra con el objeto de informar al ciudadano. Finalmente, con respecto al criterio de vida útil, la estructura se ha proyectado para una vida útil de 50 años, siendo 15 años el mínimo establecido por la EHE para edificaciones industriales (b=1,25). Con todo ello, resulta ser ISMA = 0,70 e ICES ejecución = 0,87 (Nivel A).

En la Figura 6 se muestra la pantalla de introducción de datos del criterio de optimización del armado, y en la Figura 7 la de resultados del cálculo, para este caso. El lector debe tener en cuenta que si se usa la herramienta propuesta por Garrucho y Portas (2008) para realizar el cálculo del ICES (usada por diferentes autores en diversas publicaciones), normalmente los resultados no se ajustarán a lo indicado por el Anejo, aunque las diferencias no sean demasiado importantes. De hecho, ni siquiera existe una coincidencia completa entre las variables que contempla dicha aplicación informática y las del Anejo de la EHE ya que aquella herramienta se construyó para hacer cálculos ajustados al borrador del Anejo, y no se actualizó al texto final del mismo, hoy en vigor. La herramienta informática aquí presentada resuelve este problema.

Para terminar, se ha realizado un análisis de sensibilidad del caso propuesto. Si se da el valor más desfavorable a las diferentes variables, una a una, de manera separada, a partir de los valores base antes referidos, las variables que más influyen en el ICES son la vida útil (variación del ICES: -20%) y las variables 22 (-18%), 21 (-13%), 3, 7 y 41 (-12%), 37 y 38 (-11%), 24 (-9%), 2 y 29 (-6%) y 6 (-5%). Por otro lado, si se hacen los cálculos contrarios, más favorables, las variables que más influyen en el ICES son la 19 (14%), 38 y 40 (6%), y 39 (5%).

4. CONCLUSIONES

En este artículo se han resumido los fundamentos metodológicos del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la EHE, se ha presentado una herramienta informática para realizar los cálculos necesarios para aplicar dicho modelo, y se ha mostrado un ejemplo de aplicación de la misma.

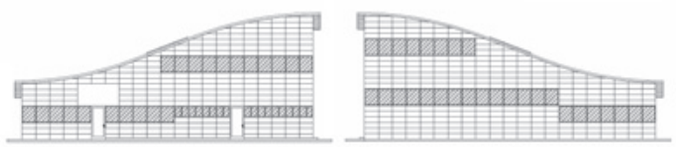


Figura 2: Fachadas testeras

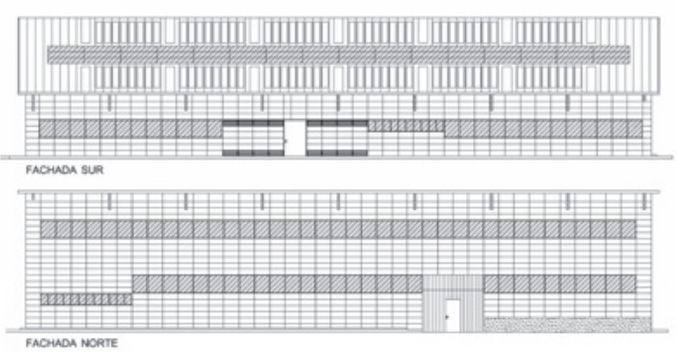


Figura 3: Fachadas laterales

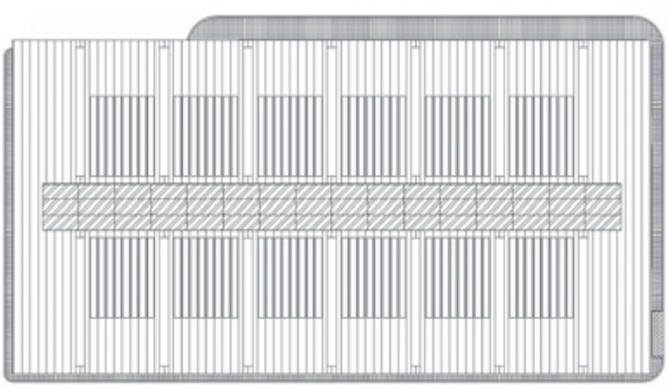


Figura 4: Planta de cubierta

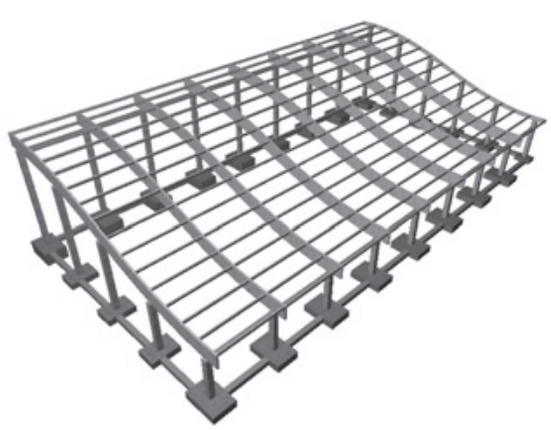


Figura 5: Esquema estructural

En general (Aguado et al., 2011), si la obra se concibe, proyecta y construye de manera razonablemente cuidadosa

y controlada, es posible alcanzar un nivel medio o incluso medio-alto del ICES, especialmente en el caso de grandes proyectos. Sin embargo, la mayoría de las estructuras son de pequeño tamaño, se construyen por pequeñas empresas, y se ejecutan de tal forma que suelen tener un ICES bajo o muy bajo. En general, si en un proyecto convencional se diseña una estructura sin preocuparse por los aspectos relativos a la sostenibilidad, los niveles de ICES serán bajos o muy bajos para proyectos pequeños y medianos, y medios o incluso bajos para grandes proyectos. No obstante, como se ha visto aquí, incluso pequeñas estructuras proyectadas en zonas geográficas periféricas pueden alcanzar niveles altos de ICES si se pone cuidado en su diseño. Se podrá argumentar que eso supone cierto incremento en los costes de inversión, pero dicho incremento no debería ser importante y, en todo caso, como normalmente uno de los aspectos que va a salir fortalecido es la durabilidad (criterio de extensión de la vida útil), los costes de mantenimiento y reparación deben ser menores y, con todo ello, los costes en el ciclo de vida de la estructura deberían a ser menores que los de la estructura proyectada de forma convencional.

De todas formas, existe una gran variedad de casos que se pueden dar, y la influencia de los costes de inversión en la durabilidad puede variar bastante. Por un lado, un análisis completo de este tipo debería plantearse por tipos estructurales, ya que, por ejemplo, un incremento en el recubrimiento tiene consecuencias diferentes sobre el incremento de volumen de hormigón a usar, y a causa de ello sobre las cargas de peso propio, y con ello sobre el armado y, por tanto, sobre los costes, dependiendo del tipo de estructura de que se trate. Por otro lado, hay que tener en cuenta los posibles casos que se pueden dar en el entorno de la estructura, ya que no es lo mismo una estructura protegida que otra que queda desnuda, en contacto con la atmósfera o el agua, o en un ambiente industrial agresivo. A su vez, para cada tipo y caso habrá diversas maneras de alcanzar una misma durabilidad, mediante diferentes combinaciones de los principales aspectos que influyen en ello, referidos en el Anejo 9 de la EHE: fundamentalmente, recubrimiento, tipo de cemento y su dosificación, resistencia del hormigón y morteros de revestimiento; cada una de esas combinaciones puede tener costes diferentes. En otro orden de cosas, para realizar un análisis coste-beneficio habría que estimar, como mínimo, horquillas de valores para el coste del m^3 de un hormigón convencional y el de otros que supongan un aumento relevante de la durabilidad, en función de las posibles combinaciones que se han mencionado para la correspondiente durabilidad de dichos hormigones y para los costes de inspección, mantenimiento y reparación de los mismos. Con todo ello habría que abordar los oportunos cálculos (flujo de caja, período de retorno, valor actual neto, etc.), con objeto de estimar la potencial rentabilidad de invertir un poco más en una estructura más duradera, y con ello ahorrar costes en el ciclo de vida. De todas formas, debe tenerse en cuenta que la actividad socio-económica y productiva puede evolucionar a un ritmo muy rápido, haciendo que las estructuras sean sustituidas mucho antes de lo previsto, por cambios de trazado de carreteras, degradación habitual de pavimentos industriales, cambios tecnológicos u operaciones económicas que hacen que la estructura o el edificio dejen de ser necesarios, entre otros aspectos. En consecuencia, no siempre resulta oportuno aumentar la durabilidad estructural, si ello supone costes adicionales e incrementos en el impacto medioambiental. Por otro lado, el estudio a realizar debería incluir también una parte de análisis de las posibilidades de obsolescencia temprana, que resulta muy difícil de anticipar, entre otras cosas porque depende de las circunstancias de cada proyecto, y porque no hay registros o bases de datos de este tipo de situaciones. Como se ve, se trata de un tema de gran interés, cuyo análisis completo sería complejo y largo, y que se sale totalmente del objeto de este artículo, al margen de necesitar, como mínimo, un texto tan extenso como el presente para resumirlo a grandes rasgos.

1.3. CRITERIO MEDIOAMBIENTAL DE OPTIMIZACIÓN DEL ARMADO

Tipo de hormigón	Volumen de hormigón (m^3)	Porcentaje de hormigón	% de armado con uniones realizadas mediante medios mecánicos	% losas de tamaño no inferior a 6 x 6 m^2 armadas con mallas electrosoldadas (*)	% armaduras elaboradas con formas según UNE 36.831	% de armado con armadura activa	Puntuación	Puntuación ponderada
Hormigón armado	294.81	100%	73%	100%	100%	0%	98.124	98.12
Hormigón pretensado	0	0%	0%	0%	0%	0%	0	0.00
Total	294.81	100%						98,12

Puntuación del criterio (0-100) = 98,12
Valor del indicador (0-1) = 1,06

(*) Si la estructura no tiene ningún elemento losa de tamaño no inferior a 6 x 6 m2 se debe contestar 100%, para no penalizar este tipo de situaciones.

ISMA (0-1) = 0,70	
ICES ejecución (0-1) = 0,87	Nivel A

Figura 6: Pantalla de introducción de datos del criterio de optimización del armado

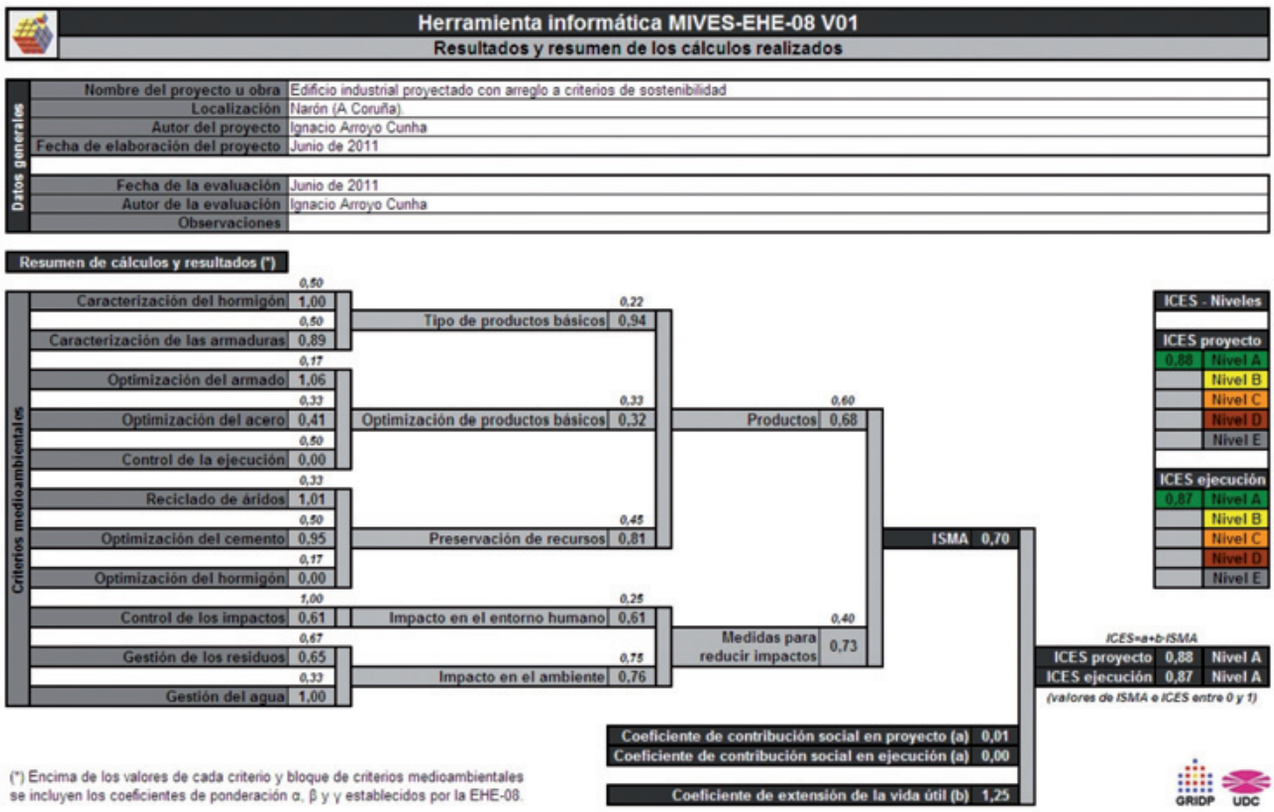


Figura 7: Pantalla de resultados

5. AGRADECIMIENTOS

Los trabajos para redactar el Anejo de la EHE y para crear esta aplicación han tenido lugar en el marco de tres proyectos financiados, respectivamente, por el Ministerio de Fomento (Orden FOM/3546/2005), la Xunta de Galicia (proyecto código 08TMT011166PR) y el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto código BIA2010-20789-C04-02).

Se agradecen las sugerencias del Prof. D. Antonio Aguado (Universidad Politécnica de Cataluña; UPC), D. Antoni Blázquez (BG Arquitectos), D. Miguel Ángel Bermúdez (Ministerio de Fomento) y D. Miguel Pérez Díaz (Universidad de La Coruña; UDC), que han permitido mejorar la herramienta informática aquí presentada. Por otro lado, diversas sugerencias de los Profs. D. Antonio Aguado, D. Alejandro Josa (UPC) y D. Fernando Martínez Abella (UDC), así como de un revisor anónimo, han contribuido a enriquecer este artículo.

6. BIBLIOGRAFÍA

-Aguado A, del Caño A, de la Cruz MP, et al. "Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code". *ASCE Journal of Construction Engineering and Management.* [en línea] 2011 [7 septiembre 2011] Disponible en Web: <http://ascelibrary.org/coo/resource/3/jcemxx/302?isAuthorized=no>, y pendiente de su publicación en papel.
-Alarcon B, Aguado A, Manga R, et al. "A Value Function for Assessing Sustainability: Application to Industrial Buildings". *Sustainability.* 2011-3 p. 35-50.
-del Caño A, de la Cruz MP. "Bases y criterios para el establecimiento de un modelo de evaluación de la sostenibilidad en estructuras de hormigón". *Cemento y Hormigón,* Abril 2008. Vol. 913 p. 6-14.
-España. Ministerio de Fomento. *Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad. Herramienta informática MIVES-EHE-08* [en línea]. [22 de septiembre de 2011]. Disponible en Web: <http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/CPH/SOTENIB_ESTRUC/>.
-España. Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08). *Boletín Oficial del Estado*, 22 de agosto de 2008, núm. 203, p.35176-35178. Anejo 13 de la Instrucción, p.487-504.
-Garrucho I, Portas I. "Manual de la aplicación del anejo ICES de la instrucción EHE". *Cemento y hormigón.* Abril 2008. Vol.913 p.44-57.
-Gómez D, del Caño A, de la Cruz MP, et al. "Managing uncertainty in the sustainable design of concrete structures". En: Asociación Española de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO) e International Project Management Association (IPMA). *Selected Proceedings of the XIV International Congress on Project Engineering.* (Madrid 30 de junio – 2 de julio de 2010), 2010. p.101-113.
-Gómez D, del Caño A, de la Cruz MP, et al. "Metodología genérica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos. El método MIVES". En: Asociación Científico-Técnica del Hormigón (ACHE) *Sostenibilidad y construcción.* En prensa a.
-Gómez D, del Caño A, de la Cruz MP, et al. "Evaluación de la sostenibilidad en estructuras de hormigón y metálicas. La EHE y la EAE". En: Asociación Científico-Técnica del Hormigón (ACHE) *Sostenibilidad y construcción.* En prensa b.
-GRIDP (Grupo de Ingeniería y Dirección de Proyectos). Software para el cálculo del ICES según la EHE-08, y según otros modelos similares [en línea]. 11 de julio de 2011, [23 de septiembre de 2011]. Disponible en Web: <http://www.ii.udc.es/GRIDP/castellano/software.html>.
-Losada R. Rojí E, Cuadrado J (ed). *La medida de la sostenibilidad en edificación industrial.* 1ª edición. Bilbao: Publicado por los autores, 2006. ISBN 84-690-2629-1.
-San José JT, Garrucho I. "A system approach to the environmental analysis of industrial buildings". *Building & Environment.* 2010. 45 p. 673-683. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.012