

Nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón

Autor: José Mel Fraga

Tesis doctoral UDC / 2017

Directores: Alfredo del Caño Gochi
M. Pilar de la Cruz López

Tutor: Alfredo del Caño Gochi

Programa de doctorado en Ingeniería Naval e Industrial



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

A mi padre

A mi abuelo

AGRADECIMIENTOS

Una vez terminado el largo recorrido de la elaboración de esta Tesis Doctoral, es necesario mencionar aquí a aquellos que lo han hecho posible durante todos estos años.

Debo agradecer en primer lugar a mi familia su comprensión, apoyo, presencia y ánimo, sin los cuales no hubiera sido posible la culminación de este trabajo.

Una parte muy grande del resultado final es debida al empeño, la profesionalidad y la paciencia de los Directores de la Tesis, Alfredo del Caño y Pilar de la Cruz. Han sido ellos los que, en muchas ocasiones, han conseguido mantener el rumbo y evitar que este proyecto quedase aparcado y abandonado. Su papel ha sido también fundamental a la hora estructurar, definir, formular y depurar la Tesis.

Durante los últimos años, han sido numerosas las personas que me han ayudado, de diferentes formas y en diferente grado. Intento citarlos a todos a continuación, por orden alfabético y, en su caso, con mención de la empresa u organización correspondiente, pidiendo disculpas por anticipado si es que he olvidado incluir a alguna persona: Antonio Aguado de Cea (Universidad Politécnica de Cataluña), Lino Ameneiro Seijo (Universidade da Coruña – Ingefer), Jesús Marcial Aneiros Rico (arquitecto técnico, ejercicio libre), Manuel Barros Somoza (ISDEFE), Manuel Beceiro Gómez (arquitecto técnico, ejercicio libre), Armando Castro Pico (Arquitectura, Materiales y Construcción - Armacon), Juan Cartelle Barros (Universidade da Coruña), Ramón Fernández Fernández (Ministerio de Defensa), Iago Fernández Traba (Cementos Cosmos – Grupo Cimpor), Diego Gómez López (Universidade da Coruña – Intacta Gestión Ambiental), Eladio Ibañez Ogando (Ministerio de Defensa), Alfonso Míguez Bravo (Técnicas Especiales de Impermeabilización y Revestimiento - Teimper), Manuel Lara Coira (Universidade da Coruña), Belinda López-Mesa (Universidad Politécnica de Valencia), Xacobe Lourés López (GOA Invest – Grupo Inditex), Almudena Sepúlveda Marón (Grupo Megasa), José María Varela Iglesias (Ministerio de Defensa), Rafael Yañez (Grupo Megasa), y Juan Zardoya Cabo (Prebetong).

Ferrol, 14 de junio de 2017

RESUMEN

El método más riguroso de evaluación de la sostenibilidad es el denominado Análisis del Ciclo de Vida (ACV), aplicable tanto a lo ambiental como a lo social y económico. Con este método se cuantifican diversos parámetros, denominados indicadores. Por ejemplo, entre otros, toneladas de CO₂ emitidas, empleo generado o coste de producción por cada tonelada producida de hormigón de un determinado tipo, con una dosificación concreta. Los problemas más importantes del ACV son, en primer lugar, que la mayoría de los profesionales de cualquier país, incluidos los países avanzados, no tienen formación suficiente para realizar estos estudios. En segundo lugar, que todavía no existe un acuerdo global acerca de la manera de realizar un ACV. En tercer lugar, que todavía no hay bases de datos completas que permitan cuantificar todos los indicadores clave; este es el caso, entre otros, de la creación de empleo. Y finalmente, en cuarto lugar, que el resultado de un ACV es un mero listado de indicadores cuantificados, que en muchos casos no sirve para tomar decisiones, porque cada alternativa de diseño tiene sus propias ventajas e inconvenientes.

Estas fueron las razones clave para que el modelo de la Instrucción española de Hormigón Estructural, EHE-08, no fuese del tipo ACV. Por el contrario, se optó por utilizar parámetros bien conocidos por los profesionales del sector, junto con una técnica multicriterio de apoyo en la toma de decisiones, el método MIVES (Modelo Integrado de Valor para Evaluación de la Sostenibilidad), que integrase los diferentes indicadores en un único índice de sostenibilidad global: el ICES (Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad). Todas las razones ya comentadas llevaron también a que en esta Tesis se plantease un modelo que emplea dicho tipo de parámetros y el mismo método de integración (MIVES) pero ahora tratando de que los resultados de aplicar dicho modelo sean coherentes con los de la aplicación de un ACV. Debe tenerse en cuenta que el modelo de la EHE-08 no sólo es pionero, sino que también es, hasta la fecha, el único de este tipo aplicado al hormigón estructural en un marco normativo.

Por diversas razones, sobre todo de plazo, el proyecto llevado a cabo para crear el modelo de la EHE-08 no incluía en su alcance la comparación de resultados de dicho modelo con resultados de ACVs. Como se acaba de comentar, esto es algo que se ha solucionado en esta Tesis.

Tras el análisis de la bibliografía generada en torno al modelo de la EHE-08 y el estudio detallado del propio modelo y de sus posibilidades de aplicación, en esta Tesis se plantearon varias preguntas. La primera era: ¿se corresponde la relevancia de cada aspecto del ICES con su importancia real en lo relativo a la sostenibilidad de la estructura analizada?. En esta Tesis se ha estudiado si la importancia que se da en la EHE-08 a cada aspecto evaluado se corresponde con los resultados de un análisis de ciclo de vida (ACV) medioambiental. La respuesta a esta primera pregunta es negativa, de acuerdo con las conclusiones de dicho análisis.

La segunda pregunta era: ¿existen aspectos relevantes de la sostenibilidad que no hayan sido tenidos en cuenta en la EHE-08 y, por el contrario, se han evaluado allí aspectos que, en realidad, son escasamente influyentes a efectos del desarrollo sostenible?. En esta Tesis se ha analizado la completitud de los aspectos medioambientales, económicos y sociales contemplados en el modelo de la EHE-08, y la respuesta a dicha pregunta es positiva, de acuerdo con las conclusiones del mencionado análisis.

La última pregunta era: ¿tiene sentido proponer un nuevo modelo de evaluación, del mismo tipo que el ya existente, que aporte información más fiable como herramienta de ayuda a la decisión en el

diseño sostenible de estructuras de hormigón?. Dadas las contestaciones a las anteriores preguntas, la respuesta a esta pregunta era positiva.

Por tanto el último objetivo de la Tesis ha sido proponer un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad para estructuras de hormigón, tomando como base el existente, que incluyese soluciones a los problemas detectados. Se propone aquí un nuevo modelo, que se ha concebido de forma genérica, no necesariamente para su integración en una normativa estructural. No obstante puede encuadrarse en ella, sin problemas. Se trata de un modelo muy completo, que es coherente con posibles ACVs de la estructura bajo análisis.

Los resultados de esta Tesis serán de aplicación para el conjunto de proyectistas y clientes que deseen construir estructuras sostenibles de hormigón armado o pretensado, sea en el marco de un entorno normativo, sea fuera de él. También serán de utilidad para el desarrollo de futuros proyectos de investigación derivados de este trabajo y enmarcados dentro del ámbito de la sostenibilidad estructural.

Está en fase de desarrollo un nuevo Código Estructural (CE) español, adaptado a los Eurocódigos. Sustituirá a la EHE-08 y a la actual Instrucción española de Acero Estructural (EAE), incluyendo un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad. Este modelo no se ha difundido todavía. Uno de los futuros desarrollos de esta Tesis será, por tanto, realizar comparaciones entre el modelo aquí propuesto y el del nuevo CE, establecer conclusiones al respecto, y proponer soluciones a los problemas detectados.

RESUMO

O método máis rigoroso de avaliación da sustentabilidade é a denominada Análise do Ciclo de Vida (ACV), aplicable tanto ao ambiental como ao social e económico. Con este método cuantifícanse diversos parámetros, denominados indicadores. Por exemplo, entre outros, toneladas de CO₂ emitidas, emprego xerado ou custo de produción por cada tonelada producida de formigón dun determinado tipo, cunha dosificación concreta. Os problemas máis importantes do ACV son, en primeiro lugar, que a maioría dos profesionais de calquera país, incluídos os países avanzados, non teñen formación suficiente para realizar estes estudos. En segundo lugar, que aínda non existe un acordo global acerca da maneira de realizar un ACV. En terceiro lugar, que aínda non hai bases de datos completas que permitan cuantificar todos os indicadores clave; este é o caso, entre outros, da creación de emprego. E finalmente, en cuarto lugar, que o resultado dun ACV é unha mera listaxe de indicadores cuantificados, que en moitos casos non serve para tomar decisións, porque cada alternativa de deseño ten as súas propias vantaxes e inconvenientes.

Estas foron as razóns craves para que o modelo da Instrución española de formigón estrutural, EHE-08, non fose do tipo ACV. Pola contra, optouse por utilizar parámetros ben coñecidos polos profesionais do sector, xunto cunha técnica multicriterio de apoio na toma de decisións, o método MIVES (Modelo Integrado de Valor para Avaliación da Sustentabilidade), que integrase os diferentes indicadores nun único índice de sustentabilidade global: o ICES (Índice de Contribución da Estrutura á Sustentabilidade). Todas as razóns xa comentadas levaron tamén a que nesta Tese expuxésese un modelo que emprega devandito tipo de parámetros e o mesmo método de integración (MIVES), pero agora tratando de que os resultados de aplicar o devandito modelo sexan coherentes cos da aplicación dun ACV. Debe terse en conta que o modelo da EHE-08 non só é pioneiro, senón que tamén é, ata a data, o único deste tipo aplicado ao formigón estrutural nun marco normativo.

Por diversas razóns, sobre todo de prazo, o proxecto levado a cabo para crear o modelo da EHE-08 non incluía no seu alcance a comparación de resultados do devandito modelo con resultados de ACVs. Como se acaba de comentar, isto é algo que se solucionou nesta Tese.

Tras a análise da bibliografía xerada en torno ao modelo da EHE-08 e o estudo detallado do propio modelo e das súas posibilidades de aplicación, nesta Tese expuxéronse varias preguntas. A primeira era: ¿correspóndese a relevancia de cada aspecto do ICES coa súa importancia real a efectos da sustentabilidade da estrutura analizada?. Nesta Tese estudouse se a importancia de cada aspecto avaliado no modelo da EHE-08 correspóndese cos resultados dunha análise de ciclo de vida (ACV) ambiental. A resposta esta primeira pregunta é negativa, de acordo coas conclusións do devandito análise.

A segunda pregunta era: ¿existen aspectos relevantes da sustentabilidade que non fosen tidos en conta no modelo da EHE-08 e, pola contra, avaliáronse aspectos que, en realidade, son escasamente influentes a efectos do desenvolvemento sustentable?. Nesta Tese analizouse a completitude dos aspectos ambientais, económicos e sociais contemplados no modelo da EHE-08, e a resposta á devandita pregunta é positiva, de acordo coas conclusións do análise aludido.

A última pregunta era: ¿ten sentido propoñer un novo modelo de avaliación, do mesmo tipo que o xa existente, que achegase información máis fiable como ferramenta de axuda á decisión no deseño sustentable de estruturas de formigón?. Dadas as contestacións ás anteriores preguntas, a resposta a esta pregunta era positiva.

Por tanto o último obxectivo da Tese foi propoñer un novo modelo de avaliación da sustentabilidade para estruturas de formigón, tomando como base o existente, que incluíse respostas aos problemas detectados. Proponse aquí un novo modelo, que se concibiu de forma xenérica, non necesariamente para a súa integración nunha normativa estrutural. Con todo, pode encadrarse nela, sen problemas. Trátase dun modelo moi completo, coherente con posibles ACVs da estrutura baixo análise.

Os resultados desta Tese serán de aplicación para o conxunto de proxectistas e clientes que desexen construír estruturas sustentables de formigón armado ou pretensado, sexa no marco dunha contorna normativa, sexa fóra dela. Tamén serán de utilidade para o desenvolvemento de futuros proxectos de investigación derivados deste traballo e enmarcados dentro do ámbito da sustentabilidade estrutural.

Está en fase de desenvolvemento un novo Código Estrutural (CE) español, adaptado aos Eurocódigos. Substituirá á EHE-08 e á actual Instrución española de Aceiro Estrutural (EAE), incluíndo un novo modelo de avaliación da sustentabilidade. Este modelo non se difundiu aínda. Un dos futuros desenvolvementos desta Tese será, por tanto, realizar comparacións entre o modelo aquí proposto e o do novo CE, establecer conclusións respecto diso, e propoñer solucións aos problemas detectados.

ABSTRACT

The most rigorous method for assessing sustainability is the so-called Life Cycle Analysis (LCA), applicable not only to the environmental, but also to the social and economic aspects. This method is based in the quantification of different parameters, called indicators. For instance, among others, the CO₂ emissions in metric tons, the employment generated or the production cost of each metric ton of a specific type of concrete, with a particular dosage. The most important problems of LCA are, firstly, that most professionals in any country, including the advanced ones, do not have the adequate education or training to carry out these studies. Secondly, that there is still no global agreement on how to perform an LCA. In third place, that there is a lack of complete databases to quantify all the key indicators; this is the case, among others, of job creation. And finally, in fourth place, that the LCA result is a mere list of indicator quantifications, that in many cases is not enough for making decisions, since each design alternative will have specific advantages and drawbacks.

These were the main reasons for establishing a sustainability assessment model not based in LCA, when the Spanish Structural Concrete Code (EHE-08) was developed. On the contrary, it was decided to employ parameters well known by all the professionals of the sector, together with a multicriteria decision support technique, the MIVES method (Integrated Value Model for Sustainability Assessment, in Spanish), for integrating the several indicators in a single, global sustainability index: the ICES (Index of Contribution of the Structure to Sustainability, in Spanish). The previously alluded reasons also led to the focus of the present work, again employing the same type of parameters and the MIVES method, but assuring that the results of applying the new model were always consistent with an LCA. It should be noted that the EHE-08 model is not only a pioneer one, but also the only sustainability assessment method employed in a structural concrete code, up to the moment.

For many reasons, especially related to time, the project carried out to create the EHE-08 model did not include in its scope the comparison of its results with the ones of applying LCAs. As just mentioned, this is something that has been solved in this work.

After analyzing the literature related to the EHE-08 model and the detailed study of that model and its applications, several questions were posed in this Doctoral Thesis. The first was: as for the sustainability of the structure under analysis, does the relevance of each ICES parameter correspond to its real importance?. In this work it has been studied whether the relevance of each aspect included in the EHE-08 model is consistent with the results of an environmental life cycle analysis (LCA). And the answer to this first question is negative, according to the conclusions of that study.

The second question was: are there relevant aspects of sustainability that have not been taken into account in the EHE-08 model and, on the other hand, does that model include indicators that, in reality, are hardly influential for the purposes of sustainable development?. In this work it has been analyzed the completeness of the environmental, economic and social aspects encompassed by the EHE-08 model, and the answer to this second question is positive, according to the conclusions of that analysis.

The last question was: does it make sense to propose a new evaluation model, of the same type as the existing one, which would provide more reliable information for making decisions in the sustainable design of concrete structures? Given the answers to the previous questions, the response to this query was positive.

Therefore, the last objective of this work was to propose a new model for assessing sustainability of concrete structures, based on the existing one, but including solutions to the detected problems. A new model is proposed here, generically conceived, not necessarily for its integration in a structural code. However, it can be included in that framework, without problems. It is a very complete model, consistent with potential LCA's of the structure under analysis.

The results of this work can be useful for designers and clients wishing to construct sustainable reinforced or prestressed concrete structures, whether in a code framework, or in other ones. They will also be useful for the development of future research projects derived from this work and framed within the scope of structural sustainability.

A new Spanish Structural Code (SSC), adapted to the Eurocodes, is currently under development. It will replace the EHE-08 and the Spanish Structural Steel Code (EAE), including a new sustainability assessment model. Despite of this, the new SSC model has not yet been disseminated. One of the future developments of this work will be, therefore, to make comparisons between the SSC model and the one here proposed, to draw conclusions on the matter, and to suggest solutions for the problems detected.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
ÍNDICE	I-1

CAPÍTULO 1 – Relevancia, utilidad y formulación de la Tesis

1.1 INTRODUCCIÓN	1-2
1.1.1.- La Sostenibilidad	1-2
1.1.2.- El Hormigón	1-3
1.1.3.- La evaluación de la sostenibilidad en el sector del hormigón	1-4
1.2 FORMULACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS	1-6
1.3 RELEVANCIA Y UTILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN DESARROLLADA	1-7
1.4 CUMPLIMIENTO DE REQUISITOS SOBRE TRABAJOS CIENTÍFICOS POR PARTE DE ESTA TESIS	1-8

CAPÍTULO 2 – Estado del arte

2.1 INTRODUCCIÓN	2-2
2.2 MODELOS DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD	2-3
2.2.1.- Introducción	2-3
2.2.2.- Diferentes modelos de evaluación de la sostenibilidad	2-3
2.2.3.- El método MIVES y el Anejo 13 de la EHE 08	2-5
2.3 ASPECTOS AMBIENTALES DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	2-8
2.3.1.- Introducción	2-8
2.3.2.- Análisis de ciclo de vida	2-8
2.3.3.- Consumo energético	2-9
2.3.4.- Impactos ambientales	2-9
2.3.5.- Aspectos normativos de las emisiones de gases de efecto invernadero	2-12
2.3.6.- El impacto ambiental del hormigón	2-13
2.3.7.- Aspectos principales de la fabricación del cemento	2-15
2.3.8.- Empleo de adiciones en la fabricación de cemento	2-16
2.3.9.- Empleo de combustibles alternativos	2-18
2.3.10.- Descripción del sector del cemento en España	2-19
2.3.11.- Aspectos principales de la fabricación del acero	2-21
2.3.12.- Aspectos principales de la producción de áridos	2-23
2.3.13.- Aspectos principales de las plantas de hormigón preparado	2-24
2.3.14.- Aspectos principales del transporte de hormigón fresco	2-25
2.3.15.- Puesta en obra del hormigón	2-25
2.4 ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	2-27
2.4.1.- Introducción	2-27
2.4.2.- La sostenibilidad económica en las estructuras de hormigón	2-28
2.4.3.- La estrategia de durabilidad en la EHE-08	2-28
2.4.4.- Selección de formas estructurales adecuadas	2-29
2.4.5.- Calidad adecuada del hormigón	2-29
2.4.6.- Recubrimientos	2-32
2.4.7.- Control de la máxima apertura de fisura	2-32
2.4.8.- Protecciones superficiales	2-32
2.4.9.- Protección frente a la corrosión de las armaduras	2-33
2.5 ASPECTOS SOCIALES DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	2-38
2.5.1.- Introducción	2-38
2.5.2.- Los objetivos de sostenibilidad de las Naciones Unidas	2-38
2.5.3.- Indicadores de sostenibilidad social	2-39
2.5.4.- La desigualdad	2-42
2.5.5.- La responsabilidad social corporativa	2-43

CAPÍTULO 3 – Metodología general de la investigación

3.1 INTRODUCCIÓN	3-2
3.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3-3
3.3 ESTUDIO DE ASPECTOS AMBIENTALES	3-4
3.4 ESTUDIO DE ASPECTOS ECONÓMICOS	3-6
3.5 ESTUDIO DE ASPECTOS SOCIALES	3-7
3.6 CONTRASTE DEL ANEJO 13 DE LA EHE-08	3-8
3.7 DESARROLLO DEL NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN	3-9
3.8 ANÁLISIS DE UN CASO PRÁCTICO	3-10
3.9 ESTABLECIMIENTO DE CONCLUSIONES	3-11

CAPÍTULO 4 – Análisis del consumo energético y de las emisiones contaminantes. Parte I: El cemento

4.1 INTRODUCCIÓN	4-2
4.2 METODOLOGÍA	4-4
4.2.1.- Planteamiento general	4-4
4.2.2.- Formulación para el cálculo energético	4-6
4.2.3.- Formulación para el cálculo de las emisiones de CO ₂	4-12
4.2.4.- Formulación para el cálculo de otros contaminantes	4-16
4.2.5.- Origen y calidad de los datos	4-17
4.3 RESULTADOS	4-22
4.3.1.- Consumo de energía primaria	4-22
4.3.2.- Emisiones de dióxido de carbono	4-27
4.3.3.- Emisiones de otros contaminantes	4-31
4.4 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	4-32

CAPÍTULO 5 – Análisis del consumo energético y de las emisiones contaminantes. Parte II: El acero

5.1 INTRODUCCIÓN	5-2
5.2 METODOLOGÍA	5-3
5.2.1.- Consumo energético y emisión de CO ₂	5-3
5.2.2.- Emisión de otros contaminantes	5-3
5.3 RESULTADOS	5-4
5.3.1.- Energía y emisiones en la producción de acero	5-4
5.3.2.- Energía y emisiones en la preparación de ferralla	5-6
5.3.3.- Energía y emisiones en el transporte del acero	5-7
5.4 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	5-8

CAPÍTULO 6 – Análisis del consumo energético y de las emisiones contaminantes. Parte III: Los áridos

6.1 INTRODUCCIÓN	6-2
6.2 METODOLOGÍA	6-3
6.2.1.- Planteamiento general	6-3
6.2.2.- Formulación para el cálculo energético	6-4
6.2.3.- Formulación para el cálculo de las emisiones de CO ₂	6-6
6.2.4.- Formulación para el cálculo de otros contaminantes	6-7
6.2.5.- Origen de los datos	6-8
6.3 RESULTADOS	6-9
6.3.1.- Consumo de energía primaria	6-9
6.3.2.- Emisiones de dióxido de carbono	6-11
6.3.3.- Emisiones de otros contaminantes	6-14
6.4 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	6-16

CAPÍTULO 7 – Análisis del consumo energético y de las emisiones contaminantes. Parte IV: El hormigón estructural

7.1 INTRODUCCIÓN	7-2
7.2 METODOLOGÍA	7-3
7.3 RESULTADOS	7-4
7.3.1.- Plantas de hormigón preparado	7-4
7.3.2.- Transporte de componentes del hormigón	7-8
7.3.3.- Transporte de hormigón fresco	7-10
7.3.4.- Puesta en obra del hormigón	7-12
7.4 MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES CONTAMINANTES DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN	7-17
7.5 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	7-20

CAPÍTULO 8 – Análisis y consideraciones de base relativas a aspectos económicos y sociales

8.1 INTRODUCCIÓN	8-2
8.2 METODOLOGÍA	8-3
8.3 ANÁLISIS DE ASPECTOS ECONÓMICOS	8-4
8.3.1.- Introducción	8-4
8.3.2.- Identificación de costes en el ciclo de vida	8-4
8.3.3.- Importancia de la durabilidad	8-9
8.3.4.- Vida útil y obsolescencia de las estructuras	8-11
8.3.5.- Factores que afectan a la durabilidad	8-14
8.3.6.- Reutilización y reaprovechamiento de las estructuras	8-15
8.4 ANÁLISIS DE ASPECTOS SOCIALES	8-18
8.4.1.- Introducción	8-18
8.4.2.- El desempleo como problema social	8-18
8.4.3.- Partes que intervienen en la construcción de una estructura de hormigón	8-19
8.4.4.- Generación de empleo en el sector del hormigón	8-21
8.5 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	8-28

CAPÍTULO 9 – Análisis crítico del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la instrucción española de hormigón estructural EHE-08

9.1 INTRODUCCIÓN	9-2
9.2 METODOLOGÍA	9-3
9.3 ESTUDIO AMBIENTAL DE CASOS PRÁCTICOS	9-4
9.3.1.- Estudio de una dosificación habitual	9-4
9.3.2.- Estudio de diferentes tipos de cemento	9-11
9.3.3.- Influencia del origen del acero	9-18
9.3.4.- Estudio de los procesos de transporte	9-21
9.4 ESTUDIO DE LOS ASPECTOS AMBIENTALES EN EL ANEJO 13 DE LA EHE	9-25
9.4.1.- Introducción	9-25
9.4.2.- Certificaciones medioambientales	9-29
9.4.3.- Distancias de transporte	9-30
9.4.4.- Criterios medioambientales “Caracterización del hormigón” y “Caracterización de las armaduras”	9-31
9.4.5.- Criterio medioambiental “Optimización del armado”	9-33
9.4.6.- Criterio medioambiental “Optimización del acero para armaduras”	9-34
9.4.7.- Criterio medioambiental “Sistemática del control de ejecución”	9-35
9.4.8.- Criterio medioambiental “Reciclado de áridos”	9-35
9.4.9.- Criterios medioambientales “Optimización del cemento” y “Optimización del hormigón”	9-36
9.4.10.- Criterio medioambiental “Control de impactos”	9-39
9.4.11.- Criterio medioambiental “Gestión de los residuos”	9-39
9.4.12.- Criterio medioambiental “Gestión del agua”	9-41
9.5 ESTUDIO DE LOS ASPECTOS ECONÓMICOS EN EL ANEJO 13 DE LA EHE	9-42
9.6 ESTUDIO DE LOS ASPECTOS SOCIALES EN EL ANEJO 13 DE LA EHE	9-44
9.7 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	9-47

CAPÍTULO 10 – Nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón

10.1 INTRODUCCIÓN	10-2
10.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO	10-5
10.3 ÍNDICE DE SENSIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL (ISMA)	10-9
10.3.1.- Introducción	10-9
10.3.2.- Requerimiento “diseño eficiente”	10-13
10.3.2.1 Introducción	10-13
10.3.2.2 Indicador M1: optimización del consumo de materiales	10-13
10.3.2.3 Indicador M2: sistemática del control de ejecución	10-15
10.3.3.- Requerimiento “impacto ambiental de los componentes”	10-16
10.3.3.1 Introducción	10-16
10.3.3.2 Indicador M3 :producción del cemento	10-18
10.3.3.3 Indicador M4: caracterización del cemento	10-20
10.3.3.4 Indicador M5: producción del acero	10-21
10.3.3.5 Indicador M6: caracterización de las armaduras	10-23
10.3.3.6 Indicador M7: producción de áridos	10-24
10.3.4.- Requerimiento “impacto ambiental del procesado del hormigón”	10-26
10.3.4.1 Introducción	10-26
10.3.4.2 Indicador M8: impacto de los procesos de transporte	10-26
10.3.4.3 Indicador M9: impacto de los procesos de elaboración y ejecución	10-29
10.4 ÍNDICE DE SENSIBILIDAD ECONÓMICA (ISE)	10-31
10.4.1.- Introducción	10-31
10.4.2.- Requerimiento “coste y prestaciones”	10-35
10.4.2.1 Introducción	10-35
10.4.2.2 Indicador E1: análisis de costes	10-35
10.4.2.3 Indicador E2: análisis de la funcionalidad	10-37
10.4.3.- Requerimiento “durabilidad”	10-39
10.4.3.1 Introducción	10-39
10.4.3.2 Carácter de la estructura	10-40
10.4.3.3 Indicador E3: reaprovechamiento de la estructura	10-41
10.4.3.4 Probabilidad de obsolescencia prematura	10-42
10.4.4.- Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU)	10-45
10.4.4.1 Introducción	10-45
10.4.4.2 Indicador V1: soluciones de diseño	10-48
10.4.4.3 Requerimiento “durabilidad de los materiales”	10-50
10.4.4.3.1 Introducción	10-50
10.4.4.3.2 Indicador V2: dosificación del hormigón	10-50
10.4.4.3.3 Indicador V3: ejecución de la estructura	10-53
10.4.4.3.4 Indicador V4: protección superficial del hormigón	10-56
10.4.4.3.5 Indicador V5: protección de las armaduras	10-58
10.4.4.4 Indicador V6: evaluación, mediciones y control de la durabilidad	10-61
10.5 ÍNDICE DE SENSIBILIDAD SOCIAL (ISS)	10-63
10.5.1.- Introducción	10-63
10.5.2.- Requerimiento “recursos humanos”	10-67
10.5.2.1 Introducción	10-67
10.5.2.2 Indicador S1: aspectos sociales del empleo	10-68
10.5.2.3 Indicador S2: aspectos sociales de la formación	10-70
10.5.2.4 Indicador S3: aspectos sociales de la prevención	10-72
10.5.3.- Requerimiento “relación de la empresa con la sociedad”	10-74
10.5.3.1 Introducción	10-74
10.5.3.2 Indicador S4: contribución a I+D+i	10-75
10.5.3.3 Indicador S5: generación de actividad local	10-76
10.5.3.4 Indicador S6: Responsabilidad Social Corporativa	10-79
10.5.4.- Indicador S7: declaración de interés general	10-80
10.6 GRUPO DE INDICADORES COMPLEMENTARIOS	10-82
10.7 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	10-84

CAPÍTULO 11 – Análisis de un caso práctico

11.1 INTRODUCCIÓN	11-2
11.2 DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA A ANALIZAR	11-3
11.2.1.- Características técnicas y constructivas	11-3
11.2.2.- Características funcionales	11-5
11.2.3.- Características adicionales	11-5
11.3 DETERMINACIÓN DEL ICES PARA EL CASO BASE	11-9
11.3.1.- Introducción	11-9
11.3.2.- Índice de Sensibilidad Medioambiental (ISMA)	11-9
11.3.3.- Índice de Sensibilidad Económica (ISE)	11-11
11.3.4.- Índice de Sensibilidad Social (ISS)	11-14
11.3.5.- Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES)	11-15
11.3.6.- Indicadores complementarios	11-16
11.4 ESTUDIO DE VARIANTES ALTERNATIVAS	11-19
11.4.1.- Introducción	11-19
11.4.2.- Variante 1. Modificación del tipo de cemento	11-19
11.4.3.- Variante 2. Empleo de elementos prefabricados	11-21
11.4.4.- Variante 3. Incorporación de otras mejoras en diferentes aspectos	11-24
11.4.5.- Variante 4. Escenario conjunto con aplicación de todas las variantes propuestas	11-26
11.5 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	11-28

CAPÍTULO 12 – Conclusiones: cumplimiento de objetivos, aportaciones, limitaciones y futuros desarrollos

12.1 INTRODUCCIÓN	12-2
12.2 CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS Y CONCLUSIONES GENERALES	12-3
12.3 APORTACIONES ORIGINALES. PUBLICACIONES.	12-6
12.4 LIMITACIONES DEL MODELO	12-8
12.5 TRABAJOS FUTUROS	12-10

ANEJOS

ANEJO 1 – Referencias

A1 Referencias A1-2

ANEJO 2 – Consumo energético y emisiones contaminantes en la producción de energía eléctrica

A2.1 INTRODUCCIÓN	A2-2
A2.2 METODOLOGÍA	A2-3
A2.2.1.- Balance anual de energía eléctrica	A2-3
A2.2.2.- Determinación de la energía primaria	A2-3
A2.2.3.- Determinación de las emisiones de CO ₂	A2-5
A2.2.4.- Determinación de las emisiones de otros contaminantes	A2-8
A2.3 RESULTADOS	A2-12

ANEJO 3 – Consumo energético y emisiones contaminantes en los procesos de transporte

A3.1 INTRODUCCIÓN	A3-2
A3.2 METODOLOGÍA	A3-3
A3.2.1.- Intensidad energética del transporte	A3-3
A3.2.2.- Emisiones de CO ₂ asociadas al transporte	A3-3
A3.2.3.- Emisiones de otros contaminantes	A3-3
A3.3 RESULTADOS	A3-4

CAPÍTULO 1: RELEVANCIA, UTILIDAD Y FORMULACIÓN DE LA TESIS

CAPÍTULO 1: RELEVANCIA, UTILIDAD Y FORMULACIÓN DE LA TESIS

1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1.- La Sostenibilidad

El término sostenibilidad puede definirse como la capacidad de llevar a cabo un determinado proceso con un mínimo o nulo impacto negativo en el entorno en el que éste influye, de modo que sea posible su prolongación de forma indefinida a lo largo del tiempo (Josa y Alavedra, 2006). Obviamente, el concepto de entorno incluye el medio ambiente planetario, y también a las personas que lo habitan. Hay que tener en cuenta que los seres humanos viven y se organizan de formas específicas, formando parte de la sociedad; esto es algo consustancial a las personas, que no podrían vivir fuera de dicha sociedad. En ella viven y desarrollan diversas actividades, entre ellas las económicas. Por tanto el término sostenibilidad tiene, como mínimo, implicaciones medioambientales, sociales y económicas.

El concepto de desarrollo sostenible parte de la definición ofrecida por la Comisión Mundial sobre Entorno y Desarrollo (WCED, de sus siglas en inglés) en su informe "Nuestro futuro común", publicado en 1987 y conocido habitualmente como "Informe Brundtland" (UN, 1987). En dicho informe, se califica de sostenible aquel desarrollo humano que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Se establece la existencia de fuertes y continuas interacciones entre tres áreas generales de interés (ambiental, económica y social) que condicionan el desarrollo de las diferentes naciones, en un entorno global, y que si avanzan en la dirección incorrecta pueden conducir a una espiral de insostenibilidad con graves consecuencias para el futuro humano.

El informe Brundtland viene a continuar la senda de trabajo iniciada en anteriores cónclaves internacionales, como las Conferencias de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano celebradas en Estocolmo en 1972 y en Nairobi en 1982. Los grupos de trabajo de dichas conferencias abordaron ya los problemas derivados de la degradación del medio ambiente, el agotamiento de los recursos del planeta, las diferencias entre países ricos y pobres y la influencia de los factores económicos y sociales sobre el entorno.

En 1992 se celebró en Río de Janeiro la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, con la participación de 172 países y que supuso un nuevo impulso al desarrollo sostenible. La Declaración de Río (UN, 1992) aprobada por la cumbre liga definitivamente el desarrollo económico a los aspectos ambientales y sociales, por medio de 27 principios que comprometen a los estados firmantes. Entre otros aspectos, y como primer principio a contemplar, la Declaración de Río dice que "Los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sostenible. Tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza", haciendo referencia a los pilares ambiental, social y económico.

En España, la Ley 2/2011 de Economía Sostenible (Jefatura del Estado, 2011) asume los postulados anteriores, indicando en su artículo 2 que *se entiende por economía sostenible un patrón de crecimiento que concilie el desarrollo económico, social y ambiental en una economía productiva y competitiva, que favorezca el empleo de calidad, la igualdad de oportunidades y la cohesión social, y que garantice el respeto ambiental y el uso racional de los recursos naturales, de forma que permita*

satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades”.

A los tres pilares de la sostenibilidad ya indicados, en ocasiones se añade un cuarto aspecto, que cuando se está abordando el problema desde el punto de vista de las estrategias nacionales e internacionales corresponde al papel institucional (contemplando aspectos políticos, legislativos, jurídicos, etc). Cuando el problema de la sostenibilidad se aborda desde el estudio de un producto o sector, algunos autores identifican como cuarto pilar a la funcionalidad (aspectos prestacionales); este es el caso de que el hormigón tenga una mayor o menor capacidad resistente cuando, por ejemplo, se sustituyen parte de los áridos convencionales por áridos de reciclaje.

Definidos de una manera básica la sostenibilidad y su marco de referencia, surge el problema de su medición o evaluación. En este sentido, se han desarrollado diversos indicadores de sostenibilidad, que funcionan como herramientas de ayuda en elección de alternativas para las organizaciones, instituciones o individuos responsables de la toma de decisiones en diferentes ámbitos. La organización internacional Global Reporting Initiative (GRI, 2011) elabora guías y formatos para la confección de informes de sostenibilidad por parte de los sectores afectados. Por otra parte, se han desarrollado numerosos indicadores específicos, como puede consultarse en la referencia Kumar et al. (2009).

1.1.2.- El Hormigón

El hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo (Glavind, 2009; Ashley y Lemay, 2008) y el segundo elemento más consumido por el hombre en la actualidad, sólo por detrás del agua. Se estima que se consume aproximadamente una tonelada anual por cada ser humano (Flower y Sanjayan, 2007).

Entre las características que lo diferencian de otros materiales estructurales se encuentran su fácil disponibilidad (ya que se produce a partir de materias primas relativamente abundantes en la mayor parte del planeta), adecuadas capacidades estructurales (incluyendo la gran libertad de diseño que permite su forma de ejecución), propiedades adicionales a las resistentes (como las de aislamiento térmico y acústico), elevada durabilidad, o mantenimiento generalmente reducido, entre otros aspectos.

El gran volumen de su producción (en España, el máximo histórico correspondió a 2006, con 97.761.000 m³, según ANEFHOP, 2013) hace que cualquier aspecto relativo al hormigón alcance una gran relevancia ambiental, económica y social. Entre otras cosas, por las siguientes razones:

- Parte de los constituyentes fundamentales del hormigón estructural, como son el cemento y el acero, provienen de procesos industriales muy intensivos en consumo de energía y en emisiones contaminantes. En 2007 las emisiones globales de CO₂ fueron de 30.674 millones de toneladas, de las cuales 1.382 millones (un 4,5%) fueron debidas a la producción de cemento (Boden y Marland, 2010). La explotación de canteras para la obtención de materias primas (calizas, áridos,...) provoca importantes alteraciones paisajísticas.
- El hormigón genera grandes inversiones, tanto en edificación residencial, terciaria e industrial como en obra civil, y la rentabilidad o amortización de las mismas depende del

periodo de vida útil alcanzado por las estructuras. Defectos en el diseño, la ejecución o el mantenimiento pueden dar lugar a deterioros prematuros y la necesidad de grandes reparaciones o incluso la demolición completa de la construcción, mucho antes de lo esperado.

- La producción del hormigón estructural y de sus componentes, junto con la construcción, mantenimiento y demolición de estructuras de hormigón generan un gran volumen de empleo, aunque en muchas ocasiones sea de baja cualificación y elevado nivel de temporalidad. Asimismo, en 2014 el sector de la construcción fue el segundo con mayor índice de incidencia de accidentes laborales, sólo precedido por el de las industrias extractivas (Ministerio de Empleo y Seguridad Social, 2015).

Las tres vertientes anteriores, tal y como se reflejó al abordar la definición de sostenibilidad, están interrelacionadas entre sí; existiendo ligaduras cruzadas entre ellas y variables que pueden tener influencias opuestas según el pilar de la sostenibilidad considerada. En la presente Tesis Doctoral se aborda el estudio y evaluación del problema de la sostenibilidad en el sector del hormigón, continuando la línea de otros desarrollos anteriores, con modelos que permiten realizar dicha evaluación de forma ágil, teniendo en cuenta la complejidad del problema global.

1.1.3.- La evaluación de la sostenibilidad en el sector del hormigón

La relación entre hormigón y sostenibilidad estuvo fuera de la regulación normativa hasta fechas muy recientes. En España, en 2008 se publicó el Real Decreto 1247/2008, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (Ministerio de la Presidencia, 2008) vigente en la actualidad, y que por primera vez incluye un documento destinado a determinar el Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES). El Anejo 13 de la EHE-08 identifica una serie de aspectos de sostenibilidad, que evalúa según las distintas alternativas de diseño y ejecución adoptadas. En función de estos parámetros se calcula un índice parecido, en concepto, a la clasificación energética de máquinas o edificios. Este enfoque ha resultado pionero a nivel internacional, generando varios trabajos y proyectos de investigación dedicados a su estudio y desarrollo (del Caño y de la Cruz, 2008; Aguado et al., 2008; Burón et al., 2008; Garrucho y Portas, 2008; Losada et al., 2008; Pacios y Martos, 2008; Alavedra y Cuerva, 2008; Vacas y Zorzona, 2008; Gómez et al., 2011; Gómez, 2012; del Caño et al., 2012; Gómez et al. 2013; del Caño et al., 2016; entre otros).

El modelo plasmado en el Anejo 13 permite la obtención de un valor numérico representativo del nivel de sostenibilidad alcanzado por la estructura estudiada; basándose en un método de toma de decisiones multicriterio (MCDM) desarrollado por investigadores españoles (San José y Josa, 2008) y denominado MIVES (Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles). El Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad incorpora un término que representa la contribución en aspectos sociales; un factor de extensión de la vida útil del elemento sobre la mínima exigida por la EHE; y el Índice de Sensibilidad Medioambiental (*ISMA*), que a su vez se obtiene mediante un sumatorio ponderado de 11 funciones de valor con diferentes parámetros. En conjunto, la expresión analítica del ICES es una función con 65 posibles variables. Los aspectos ambientales son, con diferencia, los estudiados en mayor profundidad en este modelo. De hecho, el ambiental fue el único aspecto que se encargó al grupo de trabajo sobre sostenibilidad de la EHE-08, habiéndose añadido el resto con posterioridad a la finalización del trabajo de dicho grupo.

El método más riguroso de evaluación de la sostenibilidad es el denominado Análisis del Ciclo de Vida (ACV), aplicable tanto a lo ambiental como a lo social y económico. La esencia del método consiste en cuantificar diversos parámetros, denominados indicadores. Por ejemplo, en nuestro caso, toneladas de CO₂ emitidas, empleo generado o coste de producción por cada tonelada producida de hormigón de un determinado tipo, con una dosificación concreta. Los tres problemas esenciales del ACV son:

- Que la mayoría de los profesionales (arquitectos e ingenieros) de cualquier país, incluidos los países avanzados, no tienen formación adecuada para realizar estos estudios.
- Que todavía no existe un acuerdo global acerca de la manera de realizar un ACV.
- Que todavía no existen bases de datos completas que permitan cuantificar todos los indicadores clave; este es el caso, entre otros, de la creación de empleo.

Estas fueron las razones clave para que el modelo de la EHE no fuese del tipo ACV, y de que utilizase parámetros bien conocidos por los profesionales del sector. Y estas son también las razones que han llevado a que en esta Tesis se proponga un modelo que emplee dicho tipo de parámetros, a pesar de que en todo momento se ha tratado de que los resultados de aplicar dicho modelo sean coherentes con los de la aplicación de un ACV.

Por diversas razones, sobre todo de plazo, el proyecto llevado a cabo para crear el modelo de la EHE no incluía en su alcance la comparación de resultados de dicho modelo con resultados de ACVs. Como se acaba de comentar, esto es algo que se ha tratado de solucionar por medio de esta Tesis.

Tras el análisis de la bibliografía generada en torno al Anejo 13 y el estudio detallado del propio modelo y de sus posibilidades de aplicación, se generaban varias preguntas:

- ¿Se corresponde la relevancia de cada aspecto del ICES con su importancia real a efectos de la sostenibilidad de la estructura analizada?
- ¿Existen aspectos relevantes de la sostenibilidad que no hayan sido tenidos en cuenta? Por el contrario, ¿se han evaluado aspectos que, en realidad, son escasamente influyentes a efectos del desarrollo sostenible?
- ¿Tendría sentido elaborar un nuevo modelo de evaluación, del mismo tipo que el ya existente, que aportase información más fiable como herramienta de ayuda a la decisión en materia de diseño sostenible de estructuras de hormigón?

1.2 FORMULACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS

La finalidad de esta Tesis Doctoral es dar respuesta a las anteriores preguntas, y proponer un nuevo modelo que pueda resultar de mayor utilidad a los sectores implicados (administración, empresas, proyectistas, dirección de obra, usuarios finales).

El modelo se concibe de forma genérica, no necesariamente para su integración en la normativa estructural española. No obstante, puede encuadrarse en ella sin problema.

Se definen de este modo los objetivos a cubrir por esta Tesis:

- (i) Analizar si la relevancia de cada aspecto evaluado en el Anejo 13 de la EHE-08 se corresponde con los resultado de un análisis de ciclo de vida (ACV) medioambiental.
- (ii) Analizar la completitud de los aspectos medioambientales, económicos y sociales contemplados en el Anejo 13 de la EHE-08.
- (iii) Proponer un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad para estructuras de hormigón, tomando como base el existente, que incluya respuestas a los problemas detectados en las fases de trabajos previos.

Se tiene conocimiento de que está en desarrollo un nuevo Código Estructural, que sustituirá a las actuales EHE y EAE, adaptándose a los Eurocódigos, y que incluirá también un anejo de evaluación de la sostenibilidad. El contenido del correspondiente Anejo de sostenibilidad no se ha difundido, por deseo expreso del Coordinador del correspondiente Grupo de Trabajo. Debido a ello, en esta Tesis no se establecen comparaciones con dicho futuro Anejo, ni se establece análisis alguno del mismo, manteniéndose la propuesta de esta Tesis como un desarrollo paralelo.

1.3 RELEVANCIA Y UTILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN DESARROLLADA

Los objetivos de esta Tesis son claros y coherentes con la política científica y tecnológica de las administraciones públicas españolas, por estar relacionados con la mejora de la sostenibilidad y, por tanto, con la preservación del medio ambiente y con una adecuada preocupación por el bienestar social. Los resultados del mismo serán de aplicación para el conjunto de proyectistas y clientes a quienes va dirigido en Anejo 13 de la EHE, y también al desarrollo de futuros proyectos de investigación derivados de este trabajo y enmarcados dentro del ámbito de la sostenibilidad estructural.

La transferencia de resultados está asegurada mediante la generación de publicaciones científicas en revistas, tanto de carácter científico-técnico (JCR) como de divulgación técnica. En la actualidad, existen ya dos publicaciones en revistas científicas indexadas (Mel et al., 2013; Mel et al., 2015) y cuatro comunicaciones en congresos (Mel et al., 2014a, 2014b, 2014c, 2014d) derivadas de los desarrollos realizados para la presente Tesis. Asimismo, se encuentran en fase de elaboración nuevas publicaciones que presenten los resultados de los trabajos efectuados.

1.4 CUMPLIMIENTO DE REQUISITOS SOBRE TRABAJOS CIENTÍFICOS POR PARTE DE ESTA TESIS

Esta Tesis cumple los requisitos sobre trabajos científicos que son ya tradicionales (García, 1994):

- Versa sobre algo concreto, reconocible, identificable.

- Hasta donde se puede saber, tras múltiples búsquedas bibliográficas a través de fuentes documentales y electrónicas disponibles en la Universidade da Coruña, no ha sido estudiado con anterioridad en la manera en que aquí se hace, en el sentido de que supone varias aportaciones originales al campo de que se trata, que se detallan en el correspondiente epígrafe del último capítulo.

- Aporta los datos esenciales para la verificación o refutación de las hipótesis y tesis que presenta.

- El trabajo realizado resulta de utilidad para el análisis de la sostenibilidad en proyectos de estructuras de hormigón, tanto por parte de la Administración como por proyectistas, directores de obra, contratistas y clientes finales. Asimismo, puede ser de ayuda en la redacción o modificación de directrices para el estudio de la sostenibilidad en futuras versiones de códigos estructurales españoles o extranjeros.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Para avanzar en el desarrollo de esta Tesis ha sido imprescindible realizar un proceso previo de adquisición de conocimientos relativos a todos los temas abordados en ella, que han resultado ser más variados y multidisciplinarios de lo que cabía esperar al principio del proyecto. Este capítulo cita las principales referencias consultadas y resume brevemente aspectos de su contenido que resultan de importancia para los trabajos desarrollados. No se ha pretendido incluir un análisis exhaustivo y detallado de cada tema, ya que ello conduciría a un capítulo excesivamente voluminoso. Por otra parte, poco sentido tendría dedicar tanto espacio a transcribir o comentar desarrollos e ideas de otros autores, que se encuentran disponibles en sus fuentes originales. En otro orden de cosas, por razones análogas, no se han incluido todas las fuentes consultadas, sino solamente las que han resultado más importantes en el desarrollo de este trabajo de análisis del estado del arte. Finalmente, téngase en cuenta que hay algunos aspectos del estado del arte que se encuentran en los posteriores capítulos, para una mejor comprensión de cada uno de ellos; dichos aspectos no se han repetido en este capítulo.

El recorrido comienza por el propio concepto de sostenibilidad, recogido en el capítulo anterior, y los métodos empleados para su evaluación, entre ellos el asumido por la EHE 08, y cuyo estudio será una de las piezas centrales del trabajo.

Dividido el estudio de la sostenibilidad en tres grandes bloques (ambiental, económico y social), los epígrafes siguientes profundizan en cada uno de ellos. En sentido cronológico, el estudio realizado abordó primero los aspectos ambientales, en tanto que son los más presentes en la mayoría de los análisis de sostenibilidad, y también en el que incluye la EHE. Para el estudio de dichos aspectos ambientales fue necesario clarificar conceptos previos (como el Análisis de Ciclo de Vida o los Indicadores Ambientales), conocer la estructura y el comportamiento de los sectores implicados en la construcción de estructuras de hormigón, y, por supuesto, el impacto ambiental de los diferentes procesos que intervienen y los modos de corregirlo, mitigarlo o evitarlo. En los capítulos 4 a 7 se trabaja continuamente con los conceptos señalados en este punto, ampliándolos o complementándolos cuando resulta necesario.

Posteriormente fue objeto de estudio el factor económico, principalmente en lo referido a la durabilidad de las estructuras de hormigón. En este capítulo se recoge un breve resumen de las consultas realizadas en esta materia, mientras que en el capítulo 8 se tratan otros aspectos económicos, no presentes en el modelo de la EHE, pero que sí se incluirán en el nuevo modelo desarrollado en el capítulo 10.

En último lugar se tratan los aspectos sociales de la sostenibilidad, de reconocida importancia aunque habitualmente menos estudiados que los anteriores. Al igual que en el caso anterior, el capítulo 8 amplía los comentarios aquí incluidos.

2.2 MODELOS DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD

2.2.1.- Introducción

El objeto de los métodos de evaluación de la sostenibilidad es servir de herramienta de apoyo a la decisión, proporcionando información relativa a sistemas naturales, económicos y sociales, integrada desde lo global a lo local, y con perspectiva a corto y largo plazo, que permita la selección y adopción de medidas encaminadas a construir una sociedad más sostenible (Kates et al., 2001).

Para el desarrollo de estos métodos se hace necesaria la definición de indicadores que, de una forma integrada, sistemática y reproducible, permitan representar adecuadamente la situación real que pretenden evaluar, contemplando todos los aspectos que realmente tienen relevancia en la sostenibilidad. El establecer dichos aspectos y objetivos de sostenibilidad puede resultar, en múltiples ocasiones, más complejo que la propia definición de índices (Bossel, 1999).

La medición de la sostenibilidad se ha contemplado como un proceso en dos etapas (Warhurst, 2002): primeramente se evalúan los progresos realizados en una serie de determinados campos individuales mediante indicadores de desarrollo sostenible, y a continuación la combinación de dichos indicadores individuales (teniendo en cuenta sus interrelaciones) permite evaluar el avance conjunto hacia la sostenibilidad.

Los indicadores de desarrollo sostenible pueden ser utilizados para anticipar y evaluar condiciones y tendencias, prevenir daños económicos, ambientales o sociales por medio de una alerta temprana, formular estrategias y comunicar ideas, y servir de apoyo a la toma de decisiones (Ludin, 2003). Organismos internacionales como la OCDE (OECD, 1998), la Agencia Ambiental Europea (EU, 1999) o las Naciones Unidas (UNEP, 2000) han establecido modelos de evaluación y grupos de indicadores.

2.2.2.- Diferentes modelos de evaluación de la sostenibilidad

Kumar et al. (2009) realizan un recorrido por diferentes tipos de índices de sostenibilidad, cuyas líneas fundamentales serán reseñadas a continuación, con el propósito de aportar una visión de conjunto del desarrollo actual de esta materia, en el ámbito internacional. Se han desarrollado:

- **Índices relacionados con la innovación, el conocimiento y la tecnología.** Están orientados a evaluar el comportamiento de países en cuanto a I+D+i, permitiendo comparaciones a nivel internacional dentro de este ámbito, así como mostrar la evolución temporal de una nación o región.
- **Índices de desarrollo.** También enfocados a estudios nacionales o internacionales, involucran indicadores económicos (como los relacionados con el producto interior bruto), sociales (como la tasa de desempleo o la esperanza de vida) y ambientales. Entre ellos se encuentran el Índice de Desarrollo Humano, el Índice de Bienestar Económico y Sostenible, o la Intensidad Relativa de Problemas Regionales en la Comunidad.

- **Índices basados en magnitudes económicas.** Relacionan variables como el crecimiento del producto interior bruto, la evolución del mercado de trabajo, la confianza y expectativas de los mercados y consumidores, o el ahorro, entre otros aspectos.

- **Índices basados en el comportamiento de los ecosistemas,** de especial interés para los estudios ambientales (véase el epígrafe 2.3). Entre ellos se encuentra la metodología Eco-Index (Chambers et al., 2000), el Índice Planeta Viviente desarrollado por el WWF (World Wildlife Fund; WWF, 2012) o la Huella Ecológica (Wackernagel y Rees, 1996). Esta última analiza el comportamiento ambiental de un sistema en términos de la cantidad de terreno y recursos que necesita para su funcionamiento. Cagiao (2011) ha realizado estudios para determinar la huella ecológica de la industria del cemento en España.

- **Índices compuestos de sostenibilidad para su aplicación a la industria.** Varios grupos de investigación han desarrollado grupos de indicadores que evalúan el desempeño económico, ambiental y social de una empresa determinada. Esto supone un enfoque más cercano al que se aborda en la presente Tesis que los métodos orientados a evaluaciones regionales e interregionales.

- **Índices relacionados con la gestión empresarial y la inversión.** Pretenden ofrecer información a los inversores acerca de los aspectos de sostenibilidad de las empresas que cotizan en los mercados, entendiéndose que el mundo empresarial la sostenibilidad puede ser un factor que conduzca a una situación de ventaja competitiva a largo plazo.

- **Índices de sostenibilidad basados en el producto.** Incorporan a la toma de decisiones aspectos del ciclo de vida de productos y procesos (véase el epígrafe 2.3.2). Los trabajos desarrollados en la presente Tesis se apoyan, en gran parte, en este tipo de análisis, si bien el modelo final propuesto no se vertebrará únicamente en torno al análisis de ciclo de vida de las estructuras de hormigón.

- **Índices de sostenibilidad para ciudades.** Existen varios índices que analizan las características de las ciudades en función de su configuración actual, proyección futura de desarrollo, impacto generado sobre el medio, y calidad de vida de sus habitantes.

- **Índices nacionales y regionales de políticas ambientales.** Diferentes modelos persiguen la evaluación y el control de aspectos ambientales, integrando indicadores de diferente tipo relativos a dichos aspectos (atmósfera, medio acuoso, suelo, entre otros).

- **Índices ambientales para la industria.** Son parámetros orientados a medir el desempeño ambiental de un sector o empresa, como Eco-Points y Ecoindicator 99 (Pre Consultants, 2004), o Eco-Compass (Fussler y James, 1996), entre otros.

- **Índices basados en la energía.** Relacionados con la estructura de los sectores energéticos y la demanda y utilización de energía, permiten identificar aspectos que de otro modo serían menos explícitos al comparar países desarrollados, en los que la sostenibilidad se enfoca en gran medida como una cuestión ambiental, con países en desarrollo, donde aspectos sociales como la pobreza o la desigualdad tienen una capital importancia.

- **Índices relacionados con aspectos sociales y de calidad de vida.** Se centran en aspectos como el bienestar, salud y calidad de vida, educación o igualdad de oportunidades, entre otros aspectos. Como en casos anteriores, están orientados a la evaluación de las condiciones de un país o región.

2.2.3.- El método MIVES y el Anejo 13 de la EHE 08

Una de las principales características de muchos de los métodos de evaluación de la sostenibilidad es la necesidad de realizar análisis que incorporen múltiples variables de muy diferente tipo (cualitativas o cuantitativas, continuas o discretas, medidas en diferentes unidades, etc.), las cuales suelen ser luego procesadas y sintetizadas, integradas en un único índice global de sostenibilidad. Para ello existen varias técnicas, con complejidad diversa. Entre las técnicas más rigurosas que permiten esta integración de variables se encuentra el método MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible), cuya versión determinista inicial fue desarrollada por investigadores de la Universidad Politécnica de Cataluña, la Universidad del País Vasco y Tecnalia (San José y Josa, 2008, Gómez et al., 2011). El método fue posteriormente ampliado por investigadores de la Universidade da Coruña, para tener en cuenta la incertidumbre inherente al valor que pueden tomar algunos indicadores, y para mejorar el tratamiento de la posible subjetividad a la hora de establecer la ponderación de dichos indicadores y las funciones de valor de dicho método (del Caño et al., 2012, 2016; de la Cruz et al., 2015a, b).

MIVES es una combinación de técnicas deterministas basadas en el análisis de valor. En dicho método se construye un grafo jerárquico que refleja el modelo de evaluación, en cuya parte derecha, más ramificada, se encuentran los indicadores, estando en el extremo izquierdo el índice global de sostenibilidad a calcular. A este grafo se le suele llamar árbol de requerimientos (Figura F2.1), y suele tener tres niveles, habitualmente llamados indicadores, criterios y requerimientos (aunque en la EHE-08 no se denominan de esta forma). Cada indicador de sostenibilidad puede ser cuantitativo discreto o continuo, o bien cualitativo, y puede estar expresado en unidades y escalas diferentes a las de los demás indicadores. Se emplean funciones matemáticas para transformar todos los indicadores a una misma unidad adimensional, denominada índice de satisfacción o índice de valor. Estas funciones matemáticas se denominan funciones de valor. Cada parámetro del árbol (indicadores, criterios y requerimientos) tiene su correspondiente peso, importancia o ponderación porcentual. Tras aplicar las funciones de valor a cada indicador, el índice global de sostenibilidad se obtiene por medio de su sumatorio ponderado, realizado sobre el árbol de requerimientos, de derecha a izquierda (Figura F2.1). El lector puede encontrar más información con respecto al método MIVES en de la Cruz et al. (2015a).

En realidad, como se puede intuir, se trata de una metodología genérica que puede aplicarse a otros tipos de evaluación diferentes de las relativas a la sostenibilidad. A su vez, puede aplicarse a cualquier sistema, producto o servicio.

Finalmente, los métodos MIVES probabilista (del Caño et al., 2012, de la Cruz et al., 2015a) y MIVES difuso (de la Cruz et al., 2015b, del Caño et al., 2016) combinan el método MIVES con otras técnicas, con objeto de tener en cuenta la incertidumbre y mejorar el tratamiento de la subjetividad a la hora de estimar o establecer los parámetros de un modelo MIVES. Así, por ejemplo, el primero de ellos permite tener en cuenta esa incertidumbre y la posible subjetividad empleando funciones de distribución, continuas o discretas, tanto para los indicadores, como para los pesos, como para los

parámetros que definen las funciones de valor. Tras ello emplea técnicas de simulación estocástica, tipo Monte Carlo, para obtener la función de distribución del índice global de sostenibilidad. Por su parte, el método MIVES difuso, más fácil, económico y rápido de aplicar, si bien con menores capacidades para el tratamiento de la incertidumbre y la subjetividad, emplea matemática difusa en vez de simulación estocástica. El lector puede encontrar más información con respecto a estos dos métodos en de la Cruz et al. (2015a, b).

El Anejo 13 de la EHE-08 (Ministerio de la Presidencia, 2008) presenta una formulación matemática basada en el método MIVES para la determinación del Índice de Sostenibilidad Medioambiental (ISMA), de acuerdo con el árbol de requerimientos recogido en la Figura F2.1. A su vez, establece una formulación muy simple para estimar el Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES), en función del ISMA y de otros parámetros de tipo social de aumento de la vida útil estructural.

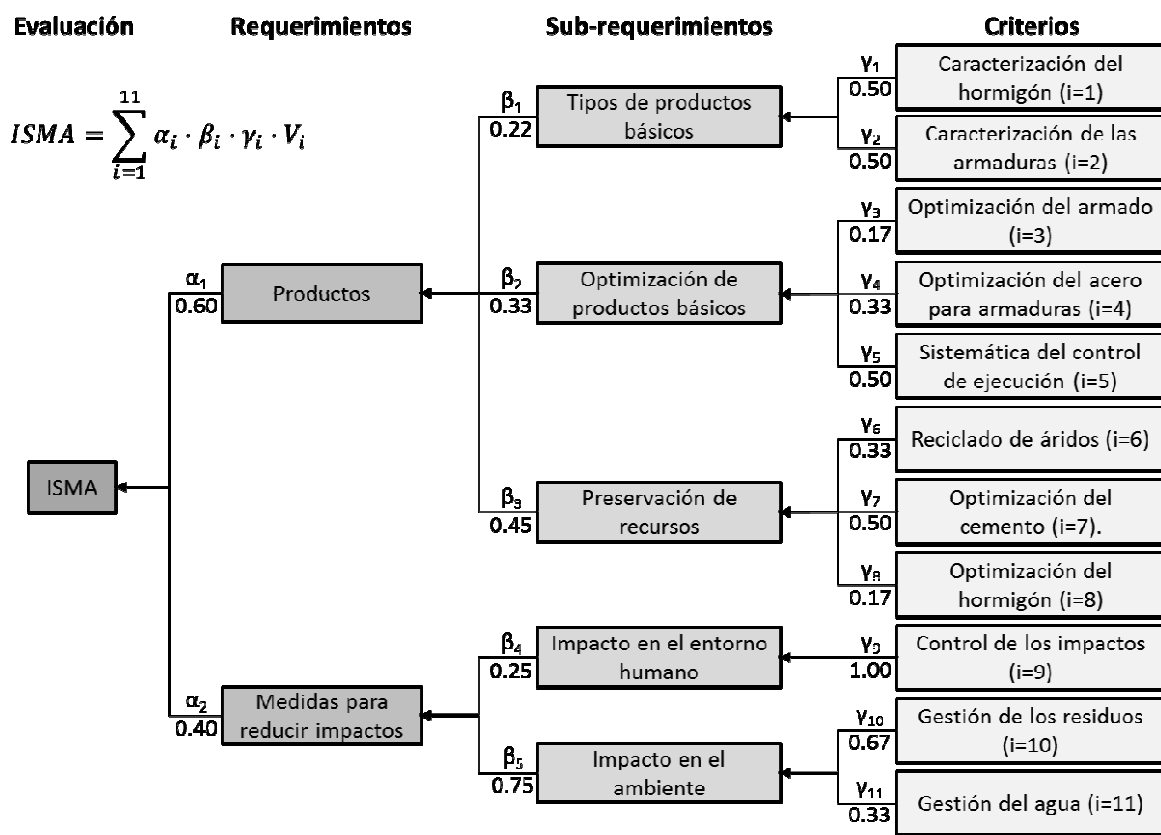


Figura F2.1: Árbol de requerimientos del Índice de Sostenibilidad Medioambiental (ISMA) de la EHE-08 (Mel et al., 2015).

La expresión [E.2.1] muestra como el ICES incorpora un término que representa la contribución en aspectos sociales (a), un factor de extensión de la vida útil del elemento sobre la mínima exigida por la EHE (b, con su valor limitado a 1.25) y el Índice de Sostenibilidad Medioambiental (ISMA). Como se puede observar en [E.2.1] a [E.2.3], solamente el ISMA tiene un enfoque basado en MIVES. Por el contrario, el ICES tiene una fórmula sencilla, que nada tiene que ver con MIVES.

Volviendo al ISMA, este parámetro se obtiene mediante un sumatorio ponderado de 11 funciones de valor V_i con diferentes parámetros, según la expresión [E2.2]. La fórmula genérica para las funciones de valor de la EHE es la recogida en la expresión [E2.3]. En conjunto, la expresión analítica del ICES es una función con 65 posibles variables.

$$ICES = a + b \cdot ISMA \quad [E2.1]$$

$$ISMA = \sum \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i \quad [E2.2]$$

$$V_i = K_i \cdot \left[1 - e^{-m_i \cdot \left(\frac{P_i}{n_i}\right)^{A_i}} \right] \quad [E2.3]$$

Cada una de las funciones de valor V_i tiene que ver con un criterio medioambiental diferente, dentro del cual se manejan varias variables, en diferente número según el ramal de que se trate. Al margen de permitir contemplar no linealidades en la evaluación, el hecho de que estas funciones de valor no sean necesariamente lineales hace que un determinado incremento en el valor de la puntuación P_i no necesariamente provoque un incremento proporcional en el valor devuelto por la función V_i . Un ejemplo de función de valor es la representada en la Figura F2.2.

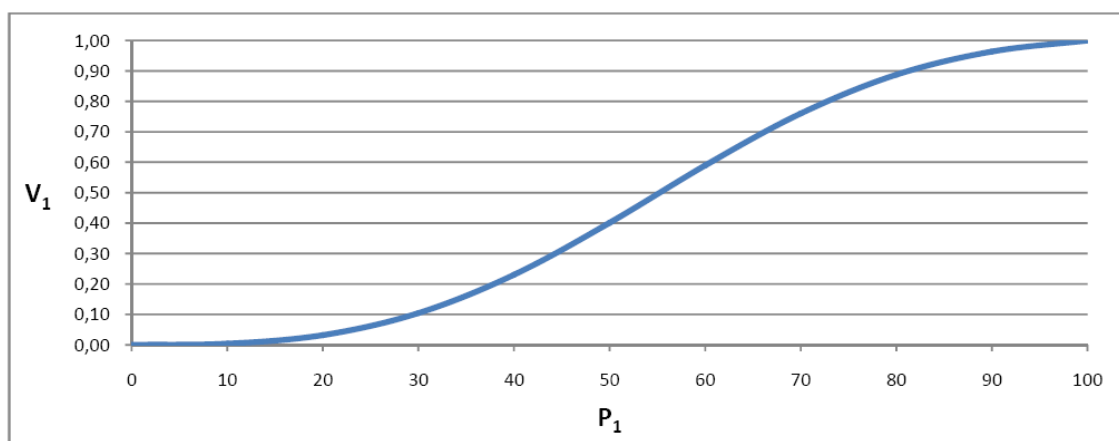


Figura F2.2: Función de valor para el criterio medioambiental de caracterización del hormigón (Gómez, 2012).

Por su parte, la variable P_i procede de la suma de las puntuaciones asignadas por el Anejo 13 a cada variable medioambiental del criterio correspondiente, mediante el uso de diversas tablas de puntuaciones establecidas por la EHE. Determinados cambios, por ejemplo, en los materiales empleados, pueden influir en más de una variable del modelo. Por ello la influencia sobre el ISMA del cambio de valor de una variable determinada puede estar condicionada también por los valores de las restantes variables que intervienen en la función de valor del criterio medioambiental correspondiente.

2.3 ASPECTOS AMBIENTALES DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

2.3.1.- Introducción

Los impactos de las actividades humanas sobre el medio ambiente son los aspectos de la sostenibilidad más ampliamente estudiados a nivel internacional, incluso desde antes de que fuese formulada la definición de desarrollo sostenible dada en el apartado anterior. En muchas ocasiones, es el único factor que se maneja cuando se habla coloquialmente de sostenibilidad.

El Anejo 13 de la EHE-08 también presta más atención a los aspectos ambientales, introduciendo ciertas consideraciones económicas a través de la durabilidad, y determinados aspectos sociales, de un modo secundario. Si bien queda claro que los tres pilares de la sostenibilidad son relevantes y que no puede ser obviado el papel de ninguno de ellos, no es ya tan evidente cual es el peso que debe tener cada uno de ellos en el indicador global que pretenda medir la sostenibilidad. Esta circunstancia será discutida en mayor detalle en capítulos posteriores, si bien puede adelantarse que tiene lógica considerar el impacto sobre el entorno como el de mayor relevancia de los tres, habida cuenta de que un deterioro global del ecosistema podría deparar consecuencias irreversibles para el futuro de la humanidad.

Dentro de este contexto, se comienza el desarrollo de las bases del nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad mediante el análisis detallado de los aspectos ambientales implicados en la construcción de estructuras de hormigón.

Para el estudio ambiental del hormigón se requiere la definición de una serie de conceptos previos y de los principales impactos que pueden provocarse sobre el medio, así como el modo de medirlos y clasificarlos. Será necesario también describir brevemente el marco legal en materia de emisiones y las características de los componentes y procesos industriales implicados en el sector del hormigón.

2.3.2.- Análisis de ciclo de vida

La norma UNE-EN ISO 14040:2006 (AENOR, 2006) define el análisis de ciclo de vida (ACV) como *“la recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a través de su ciclo de vida”*, entendiéndose por producto cualquier bien o servicio.

El ACV abarca desde el estudio de las materias primas y recursos utilizados en la producción, hasta la disposición final del producto, una vez agotada su vida útil. Contempla la visión en conjunto de los impactos ocasionados durante el ciclo de vida del producto, en lugar de realizar una evaluación individual de cada propiedad. Se trata de un enfoque holístico, que propugna la concepción de cada realidad como un todo distinto de la suma de las partes que lo componen.

Lo ideal es que las fronteras del sistema considerado para el análisis abarquen desde la extracción de las materias primas, incluyendo los combustibles empleados, hasta el final de la vida útil del producto incluyendo, entre otros aspectos, el manufacturado, transporte, fabricación de bienes de equipo, mantenimiento, desmantelamiento y desecho. Este tipo de análisis es lo que se conoce como *“de la cuna a la tumba” (cradle-to-grave)*. Se habla de análisis *“de la cuna a la cuna”* cuando el ACV incluye las actividades posteriores necesarias para reutilizar o reciclar los materiales procedentes del desmantelamiento, para su uso en un nuevo producto, que en nuestro caso será una nueva

estructura. Otros tipos habituales de condiciones de contorno para el ACV son las denominadas “*de la cuna a la puerta*” (*cradle-to-gate*), incluyendo todos los impactos generados hasta que el producto sale de la fábrica; y “*de la cuna al sitio*” (*cradle-to-site*), que abarca desde el origen hasta que el producto alcanza su punto de consumo.

Para el desarrollo de los trabajos comprendidos en esta Tesis se han consultado diferentes ACVs, cuyas referencias se detallarán posteriormente. También se ha empleado la metodología propia de esta herramienta para estudiar los diferentes procesos contemplados.

A efectos ambientales, el ACV proporciona una información relevante tanto en sus entradas como en sus salidas. Las entradas al sistema pueden reducirse, en general, a consumos de materias primas y energía. Entre otros aspectos las salidas incluyen, además del propio producto, las emisiones indeseadas al entorno (a la atmósfera, al medio acuático y al suelo) y la generación de residuos y subproductos. Un análisis de ciclo de vida completo puede ofrecer una larga lista de resultados, tanto más detallada cuanto más exhaustivo sea el estudio realizado. En la actualidad existen paquetes de software especializados en la realización de ACVs, basados en el empleo de bases de datos comerciales con gran cantidad de referencias. Este es el caso, por ejemplo, de SimaPro (PRé Consultants, 2016) y GaBi (Thinkstep, 2016), entre otros.

2.3.3.- Consumo energético

Se define energía primaria como aquella que existe en una forma natural (por ejemplo el carbón), antes de ser convertida a otra forma para su uso final (como podría ser la electricidad) (IEA, 2004). La transformación de un tipo de energía a otro es habitual, existiendo siempre una pérdida debida a los rendimientos de los procesos de conversión empleados. Los procesos basados en la combustión de sustancias fósiles como el carbón, el petróleo o el gas, se emplean ampliamente en la actualidad para la obtención de energía final térmica, eléctrica o mecánica. En general, estos procesos presentan rendimientos bajos; esto implica un consumo de energía primaria muy por encima del consumo “visible” de energía que finalmente se aprovecha por parte del usuario. Para la cuantificación de la energía consumida durante el ciclo de vida de un producto es necesario traducir todos los aportes energéticos en sus procesos a su energía primaria equivalente.

En ocasiones se designa al total de la energía primaria consumida por un material a lo largo de su ciclo de vida por el término inglés “*embodied energy*” (traducido al español como “energía cautiva”, “energía incorporada” ó “energía gris”), expresado en unidades de energía (MJ o GJ) por unidad de masa, volumen o superficie (Hammond y Jones, 2008; Goggins et al., 2010). Se suele llamar unidad funcional (UF) a ésta última unidad. Así, por ejemplo, en función de lo que se desee hacer, se podría estimar el consumo de energía en MJ por tonelada o por m³ de hormigón, o por m² de forjado, con un canto determinado.

2.3.4.- Impactos ambientales

Los efectos negativos sobre el medio ambiente relacionados con la producción, utilización y disposición final de un bien o servicio no tienen un carácter unidimensional ni son siempre comparables en los mismos términos, sino que en realidad existe un conjunto de características y emisiones que pueden afectar al entorno de diferentes modos. Se han establecido varias categorías de impactos detalladas, entre otros, por Heijungs et al. (1992). Al igual que se reseñó al definir el

ACV, una relación detallada de todas las posibles categorías de impacto asociadas a un determinado producto puede abarcar una gran cantidad de parámetros y contaminantes. Aun así, no siempre es necesario disponer de una imagen tan completa para establecer una valoración del comportamiento ambiental de una determinada alternativa de producto. Dentro de cada categoría se establece un indicador numérico, generalmente en base a una cantidad de determinada sustancia tomada como parámetro de referencia. A continuación se reseñan brevemente las principales categorías señaladas por Heijungs et al. (1992), habitualmente presentes en los análisis de ciclo de vida.

- **Agotamiento de recursos abióticos.** Trata de medir la disminución de la disponibilidad de recursos naturales desprovistos de vida (abióticos), incluyendo materias primas y energéticas. Relaciona el consumo de un determinado recurso con las reservas existentes del mismo. La manera de establecer dicha relación puede hacerse de diferentes formas; una de ellas es dando al indicador un peso tanto mayor cuanto más escaso sea el recurso. Existe una abundantísima cantidad de tipos de recursos diferentes que se usan en la industria y, por tanto el agotamiento de recursos abióticos puede medirse de forma individual, para cada recurso concreto, y esto se puede hacer, sin grandes problemas, cuando los productos alternativos emplean los mismos materiales y el mismo tipo de energía. Sin embargo este tipo de cuantificación complica las posibles comparaciones entre productos alternativos que empleen materiales y energía de diferentes tipos. Por ello, como en el caso de otras variables, la evaluación se puede realizar empleando una unidad, denominada equivalente, relacionada con un recurso de referencia y aplicable a cualquier producto. Así, por ejemplo, el agotamiento de recursos abióticos puede expresarse en kg equivalentes de antimonio por unidad funcional. Como ya se ha anticipado, no existe un acuerdo global sobre la forma de realizar un ACV, y esa falta de acuerdo incluye la forma de medir los indicadores. Según se ha indicado, el consumo de recursos abióticos puede medirse individualmente; así, por ejemplo, se pueden medir los consumos de:

+ **Recursos renovables** (p. ej., de madera o agua, en Kg/UF). Téngase en cuenta que algunos recursos renovables dejan de serlo dependiendo de su uso. Así, por ejemplo, el uso indiscriminado de la madera no es sostenible, y en estas condiciones el recurso deja de ser realmente renovable. Para que sea auténticamente renovable debe usarse madera certificada por una entidad de confianza, que compruebe que dicha madera ha sido obtenida de bosques gestionados de forma sostenible, en los cuales se genera más madera natural de la que se tala.

+ **Recursos no renovables** (p. ej., de árido, en Kg/UF).

También pueden usarse indicadores que den idea de la posible reutilización o reciclaje de los materiales usados. Así, por ejemplo:

+ **Reutilización de sistemas constructivos** (en la forma de un % sobre el total).

+ **Uso de materiales reciclados, subproductos o residuos** (%).

+ **Reciclabilidad del producto resultante (%) o facilidad de reciclaje del mismo** (puntuación de 0 a 100 o de 0 a 10, o niveles: muy baja, baja, media, alta, muy alta).

- **Consumo de energía.** Se trata de algo ya referido aquí anteriormente, pudiendo emplearse como indicador el consumo total de energía primaria por unidad funcional (de masa,

superficie o volumen, entre otras posibles unidades). Al igual que antes, podemos hacer distinciones entre uso de energías renovables y no renovables.

- **Utilización del suelo.** Relacionado con la pérdida de biodiversidad, es decir, de variedad de especies animales y vegetales en el medio ambiente, y con la afección de las actividades humanas al suelo y al funcionamiento del ecosistema. Resulta complejo establecer un indicador global de utilización del suelo, y por ello se pueden emplear varios indicadores complementarios para ello. Así, por ejemplo, se pueden evaluar la disminución de suelo para especies naturales, y también los cambios en la calidad del suelo. Ambos efectos pueden hacer disminuir la biodiversidad. También se puede evaluar el coste marginal asociado al uso del suelo: si se van a ocupar vastas extensiones de terreno, es preciso valorar si hay usos alternativos de mayor valor añadido o de mayor repercusión social (agricultura, ganadería, entre otros).

- **Cambio climático.** Es probablemente la categoría objeto de mayor número de estudios y con mayor presencia en los medios de comunicación, debido a que existen ya síntomas relevantes de los efectos de la elevación de la temperatura del planeta causada por la acumulación de gases de efecto invernadero. Dada su gran relación con algunos de los procesos implicados en la construcción de estructuras de hormigón (producción de acero y de cemento), será abordado en mayor extensión en un epígrafe posterior. Existen diferentes sustancias que pueden provocar efecto invernadero, como es el caso del vapor de agua, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el N₂O o los compuestos fluorocarbonados (CFCs), entre otras. El indicador de cambio climático más usual es el kg equivalente de CO₂ por unidad funcional.

- **Agotamiento de la capa de ozono.** Mide la destrucción de la capa de ozono de la estratosfera, que actúa como filtro frente a radiaciones ultravioleta (UV). La disminución de esta capa incide tanto en el medio como en la salud humana. Los CFCs y los compuestos hidroclorofluorocarburos (HCFCs) son ejemplos de sustancias que provocan este problema. El indicador más usual es el kg equivalente de CFC-11 por unidad funcional.

- **Acidificación del medio ambiente.** Mide la variación de la acidez del medio debida a la aparición de ácidos derivados de la emisión de óxidos de azufre y nitrógeno (SO_x y NO_x). Como indicador se suelen emplear los gramos equivalentes de H⁺, o bien los kg equivalentes de dióxido de azufre (SO₂), por unidad funcional.

- **Eutrofización.** Consiste en el incremento de la biomasa (organismos vivos) de un ecosistema acuático, como consecuencia de la elevación de la concentración de macronutrientes en el agua, principalmente a base de fosfatos (PO₄³⁻) y nitratos (NO₃⁻). Se suele producir un crecimiento excesivo de algas, con enturbiamiento del agua. Las algas y otros organismos, cuando mueren, son descompuestos por la actividad de las bacterias. En este proceso la materia orgánica es oxidada, empleándose oxígeno disuelto en el agua. Como poco, la disminución de oxígeno hace que el agua pierda calidad, pudiendo tener problemas de sabor y olor, e incluso pueden aparecer toxinas producidas por algunos tipos de algas. En general la insuficiencia de oxígeno en el agua conduce al desequilibrio del medio y al empobrecimiento de la biodiversidad, con posibilidad de condiciones anaerobias e incluso de extinción de vida aeróbica; los peces suelen ser los principales perjudicados. Teniendo en cuenta que una parte de la fauna y flora externa a las aguas depende de ellas y de su fauna y

flora para su sustento, la eutrofización puede tener también consecuencias sobre el resto del ecosistema. Este indicador se suele medir en kg equivalentes de PO_4^{3-} por unidad funcional.

- **Niebla de verano, contaminación de verano, o formación de foto-oxidantes.** En verano, en determinadas condiciones, se puede generar ozono en la troposfera (capa de la atmósfera en contacto con la superficie de la Tierra), por medio de reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV: CH_3CO , C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , entre otros), o por reacciones del CO. El O_3 es un agente oxidante e irritante para todos los seres vivos. Su indicador son los kg equivalentes de etileno (C_2H_4) por unidad funcional.

- **Toxicidad y Ecotoxicidad.** Miden la presencia de sustancias tóxicas (por ejemplo, Pb, Zn) en el medio ambiente, por causa por la actividad humana. Se diferencia entre toxicidad humana (Toxicidad) y toxicidad que afecta al medio acuático o terrestre (Ecotoxicidad). Posibles indicadores de toxicidad humana y para el medio son, respectivamente, los kg equivalentes de plomo y de zinc por unidad funcional. Como hemos anticipado, no hay un acuerdo global con respecto al ACV, y también se usa como indicador común a estos dos aspectos el kg de 1,4 diclorobenceno (1,4-DCB) equivalente por unidad funcional.

- **Emisiones de partículas.** De las partículas emitidas a la atmósfera las de tamaños inferiores quedan en suspensión en el aire y entran en vías respiratorias, siendo perjudiciales para la fauna y las personas. Son especialmente problemáticas las partículas de menos de 10 μm de diámetro (PM10). Este indicador suele medirse Kg de PM10 por unidad funcional.

- **Otros indicadores.** Hasta aquí se han señalado los indicadores más importantes y más frecuentemente empleados. Sin embargo, como se ha anticipado, hay una gran cantidad de emisiones que provocan problemas al medio ambiente y las personas. Son ejemplos de ello indicadores relativos a la emisión de metales pesados al aire y al agua (p. ej., medidos en kg equivalentes de Pb); la emisión de sustancias carcinógenas (p. ej., medidos en kg de hidrocarburos aromáticos policíclicos; HAP); la niebla de invierno, provocada por altas concentraciones de dióxido de azufre (SO_2) y partículas en suspensión, que producen condensación del vapor de agua bajo condiciones de baja temperatura y alta humedad (p. ej., medidos en kg equivalentes de SO_2); así como otros indicadores varios relacionados con la desecación, las radiaciones, el olor, el ruido, la generación de residuos y su vertido a vertederos convencionales y especiales, y los posibles impactos por vertidos líquidos y sólidos al medio.

2.3.5.- Aspectos normativos de las emisiones de gases de efecto invernadero

El Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático fue establecido en 1992, con objeto de impulsar el estudio de los efectos de las actividades humanas sobre el efecto invernadero y la alteración climática, así como las acciones encaminadas a su mitigación. (Serra, 2004). Los planteamientos de este Convenio fueron desarrollados posteriormente en el Protocolo de Kyoto (UN, 1998).

El Protocolo supone la creación de un mercado de derechos de emisión de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre), como método para el control y la limitación de su concentración en la atmósfera. En la Unión Europea (UE) este mercado se materializó a través de la Directiva 2003/87/CE

del Parlamento Europeo y del Consejo (Parlamento Europeo, 2003). Dicha directiva se traspone al ordenamiento jurídico español a través de la Ley 1/2005 (Jefatura del Estado, 2005). Esta Ley afecta, entre otras, a las instalaciones para la fabricación de clinker en hornos rotatorios con una capacidad superior a 500 toneladas diarias, a las industrias de producción de acero y a las instalaciones de producción de energía eléctrica con potencia superior a 20 MW. Según su artículo 4º, para las instalaciones afectadas es necesario solicitar una autorización para emitir gases de efecto invernadero a la atmósfera. Estas emisiones deben de ser cuantificadas y notificadas. La Ley 1/2005 crea el Registro Nacional de Derechos de Emisión (RENADE), de acceso público y asignado al Ministerio de Medio Ambiente.

2.3.6.- El impacto ambiental del hormigón

Para estudiar los efectos de la construcción de estructuras de hormigón sobre el medio ambiente, es necesario tener en cuenta:

- i) Que está formado por cemento, acero, áridos de diferente granulometría, agua y aditivos.
- ii) Que implica, además de la fabricación o procesado de los anteriores componentes, el transporte de los mismos, la mezcla y preparación del propio hormigón, su transporte al punto de utilización y la ejecución de los elementos estructurales (en obra o en instalaciones industriales, en el caso de la prefabricación).

Para evaluar todo el ciclo de vida de la estructura hay que tener en cuenta también su mantenimiento, reparación, demolición y disposición final de los residuos (reciclaje o vertido).

A modo de introducción, se comentan a continuación una serie de características del hormigón que Ashley y Lemay (2008) señalan como favorables a la sostenibilidad (según dichos autores):

- El hormigón se produce a base de ingredientes que requieren un procesado reducido.
- La mayor parte de sus componentes se adquieren y manufacturan a nivel local, disminuyendo el impacto debido al transporte.
- Presenta una vida útil prolongada, tanto en edificios como en infraestructuras, que incrementan el período entre reconstrucción, reparación y mantenimiento.
- Permite el reciclaje de subproductos y residuos industriales.
- En edificación, combina aislamiento con alta inercia térmica y baja permeabilidad de aire. Empleado como pavimento o recubrimiento exterior, reduciendo el efecto urbano denominado "isla térmica".

Los trabajos llevados a cabo para el desarrollo de esta Tesis permiten discutir algunas de estas afirmaciones, probablemente benévolas en exceso, de cara a introducir los aspectos a tratar en los epígrafes siguientes.

La primera característica que los autores señalan como positiva es, con creces, la más rebatible. Es cierto que la producción de hormigón a partir de sus componentes requiere un proceso sencillo

(dosificación y amasado, principalmente) y que se realiza en instalaciones poco complejas (plantas de hormigón), que incluso pueden ser móviles y estar operadas por un personal mínimo. Sin embargo, la producción de dichos componentes resulta mucho más compleja, costosa y agresiva en términos ambientales. La fabricación de cemento y acero requiere instalaciones de industria pesada, sometiendo a materias primas minerales a procesos térmicos con un elevado consumo de combustibles (principalmente de origen fósil) y energía eléctrica.

Asimismo, la segunda aseveración presenta circunstancias similares. La adquisición de los componentes puede ser local a nivel de la planta de hormigón, que al mismo tiempo no suele ser muy distante de las localizaciones de obra dado que existe un límite de tiempo para el transporte del hormigón fresco. Sin embargo, la producción de esos componentes (en especial el cemento y el acero) se radica en complejos industriales muy concretos, desde los cuales se transporta a puntos de venta distantes. En el caso de España, las distancias de transporte más altas corresponden al acero, dado que existe un número muy reducido de instalaciones que fabriquen armaduras corrugadas.

Si bien las consideraciones acerca de la vida útil tienen, efectivamente, implicación en los aspectos ambientales, serán tratadas en detalle en el capítulo dedicado a los aspectos económicos de la sostenibilidad ya que, dentro de ellos, el más ampliamente estudiado es precisamente la durabilidad de las estructuras de hormigón.

La incorporación de residuos y subproductos industriales a los procesos relacionados con el hormigón, en cambio, sí resulta un aspecto positivo de capital importancia para la mejora de la sostenibilidad de este sector. En los últimos años se han desarrollado numerosas técnicas de aprovechamiento de combustibles alternativos en la fabricación de cemento. Los hay de origen biológico, como los restos forestales, cáscara de arroz, huesos de aceitunas o harinas animales, entre otros; también residuos convencionales e industriales, como los aceites, disolventes, pinturas, neumáticos fuera de uso (NFUs), o residuos sólidos urbanos. También existe una amplia utilización de materiales cementantes sustitutivos del clinker, denominadas adiciones, que pueden ser residuos, como las cenizas volantes o las escorias de alto horno; subproductos de otras industrias, como el humo de sílice; o sustancias minerales no procesadas térmicamente, como las puzolanas. En la fabricación de acero para armaduras juega un papel muy importante el reciclaje de chatarra, que permite una mejora muy sustancial del perfil ambiental con respecto al acero primario. Finalmente, también existe la posibilidad de reciclar como árido el propio hormigón procedente de demoliciones; complementariamente a ello se produce un efecto sumidero de CO₂, por medio de la carbonatación del hormigón triturado. Todos estos aspectos, significativos y reflejados en los trabajos realizados, son citados por Damtoft et al. (2008), como las principales contribuciones positivas del hormigón a la lucha contra el cambio climático.

Por último, los aspectos relacionados con las propiedades térmicas del hormigón y la eficiencia energética de las edificaciones que lo emplean no han sido considerados en esta Tesis, al entender que deben de ser valorados en el contexto de un análisis de la sostenibilidad de un determinado conjunto constructivo, y no desde el punto de vista únicamente estructural. Por otra parte, introducir criterios de esta clase en los modelos propuestos sería difícil en caso de pretender abordar el estudio de la sostenibilidad de, por ejemplo, infraestructuras públicas u otras construcciones no relacionadas con la edificación. En todo caso, las afirmaciones al respecto realizadas por Ashley y Lemay (2008) también son discutibles, ya que el hormigón no es un buen aislante térmico, por mucho que tenga una alta inercia térmica. La realidad es que, salvo excepciones de edificios u otras construcciones que no necesitan aislamiento térmico (marquesinas, algunas naves industriales), los cerramientos que

emplean hormigón necesitan complementarse con otros materiales que realmente aporten es aislamiento. Por otro lado, todos los materiales pétreos contribuyen, en mayor o menor medida, al efecto de “isla de calor”. Este efecto consiste en la acumulación diurna de calor en zonas urbanas, por parte de materiales con alta inercia térmica, con posterior dificultad de disipación de dicho calor durante las horas nocturnas (momento en el cual las zonas no urbanas se enfrían), normalmente en situaciones de estabilidad atmosférica. El hormigón y las fábricas pétreas, junto con el asfalto, contribuyen a todo ello, y la solución al efecto “isla de calor” no está en el hormigón, sino en otros tipos constructivos, como es el caso de los cerramientos verdes (cubiertas y fachadas verdes, ajardinadas).

2.3.7.- Aspectos principales de la fabricación del cemento

El hormigón armado es un material compuesto empleado desde mediados del siglo XIX, formado por acero, áridos, aditivos, agua y un ligante hidráulico, el cemento. El cemento se obtiene mezclando y moliendo clinker (un producto intermedio) con yeso y otras sustancias. La producción de clinker es, con diferencia, la etapa más costosa de este proceso, tanto en términos energéticos como ambientales.

El clinker se fabrica mediante la calcinación de una mezcla de materias primas naturales, principalmente piedra caliza, y también margas, arcillas y sílice. El porcentaje de caliza empleado en dicha mezcla tiene un orden de magnitud del 70% al 80%. Los materiales antedichos se someten previamente a procesos de preparación, que incluyen su molienda y homogeneización. La mezcla se calienta posteriormente en hornos rotatorios, hasta temperaturas del orden de 1500 °C. Estos hornos funcionan habitualmente con combustibles de origen fósil (fuel, carbón, gas natural), si bien existen en la actualidad plantas en las que éstos se sustituyen por otros alternativos que ya se han comentado aquí (neumáticos fuera de uso, aceites usados, biomasa, residuos sólidos urbanos).

Químicamente, lo que ocurre en el horno de clinker es una reacción conocida como descarbonatación, por la cual la caliza (carbonato cálcico; CaCO_3) se descompone en óxido de calcio (CaO , 56.03% en masa del CaCO_3) y dióxido de carbono (CO_2 , 43.97%).

El porcentaje de CaO en el clinker oscila entre el 60% y el 69%. La parte restante la completan óxidos de silicio (18-24%), alúmina (4-8%) y óxido de hierro (1-8%), procedentes de materias primas secundarias. El CaO forma con estos compuestos di- y tri-silicatos de calcio, que al hidratarse darán lugar a las características propiedades de fraguado y endurecimiento del hormigón.

El clinker se muele junto a otros productos para obtener cemento. El principal de estos productos es el yeso dihidrato ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), empleado como regulador de fraguado. También se añaden margas, sulfatos y aditivos. Parte del clinker puede ser substituido por otras sustancias, denominadas adiciones, ya aludidas con anterioridad (cenizas volantes, escorias de alto horno, humo de sílice, puzolanas naturales, esquistos calcinados, calizas). Esta sustitución puede ser doblemente beneficiosa, ya que permite reducir la cantidad de material calcinado en el horno, y al mismo tiempo reciclar residuos de otros procesos industriales. En función de su contenido en clinker y de la naturaleza de las adiciones, se clasifican los cementos en diferentes tipos. En España esto se hace a través de la Instrucción para la recepción de cementos RC-16 (Ministerio de Presidencia, 2016).

Existen cuatro procesos para la fabricación del cemento:

- Seco, en el cual las materias primas son trituradas y secadas para formar el crudo o harina, que alimenta a un horno con precalentador o pre-calcinador.
- Semiseco, en el cual el crudo es granulado con agua.
- Semihúmedo, escurriendo pasta de crudo y agua en filtros prensa.
- Húmedo, en el cual las materias primas se muelen directamente con agua, formando una pasta bombeable que después pasa al horno. Los procesos húmedos presentan mayores consumos de energía.

En España la práctica totalidad de los hornos existentes son de vía seca (el 93%, según la referencia Ministerio de Medio Ambiente, 2004).

Durante la fabricación del cemento se consume gran cantidad de energía, fundamentalmente en el horno de calcinación. En estos hornos se generan además emisiones de CO₂, NO_x, SO_x y partículas en suspensión. Adicionalmente, con el mismo tipo de emisiones, se consume energía eléctrica y gasóleo en equipos móviles y maquinaria de cantera, donde también tiene lugar una gran generación de polvo. Por su parte, el proceso de descarbonatación que tiene lugar en el horno libera también una gran cantidad de CO₂, independiente de la combustión, como se ha indicado anteriormente.

La principal vía de emisión de CO₂ en la industria del cemento es la calcinación de materiales carbonatados en el horno de clinker (IPCC, 2006). Esta vía supera incluso a las emisiones producidas en generación de energía térmica a partir de combustibles fósiles. El constituyente mayoritario de la caliza y otras materias primas minerales es el carbonato cálcico (CaCO₃), que mediante el aporte de calor en el horno se descompone en CaO (uno de los óxidos que reaccionarán para formar el clinker) y CO₂, en la reacción de descarbonatación ya aludida, en las proporciones referidas con anterioridad (aprox. 56-44% en masa del CaCO₃). Además, durante la calcinación puede generarse polvo de horno de cemento (*cement kiln dust*: CKD), material calcinado que no se incorpora al clinker final.

En el caso más general, y en ausencia de datos de mayor precisión, las emisiones de CO₂ provocadas por la descarbonatación en el horno pueden determinarse analíticamente multiplicando la cantidad de clinker que se produce por un factor de emisión correspondiente a dicho clinker. El clinker contiene una media del 65% de CaO, proveniente en su totalidad de la calcinación. Suponiendo que la totalidad de ese óxido de calcio proviene del carbonato cálcico, para obtener 1 t de clinker se necesitarán 1,1601 t de CaCO₃, que a su vez darán lugar a 0,5101 t de CO₂. Esta cantidad se incrementa, para tener en cuenta las emisiones debidas al polvo que se ha perdido en el horno, en un 2% (estimación para instalaciones actuales con sistemas de recirculación de polvo). Operando con ello se obtiene un factor de emisión total de 0,52 toneladas de CO₂ por tonelada de clinker (IPCC, 2006). Este ratio es muy revelador, y más teniendo en cuenta que en él no se incluyen las emisiones correspondientes a la combustión, ni la contribución de otros carbonatos presentes en las materias primas diferentes del CaCO₃.

2.3.8.- Empleo de adiciones en la producción de cemento

Existen materiales cementantes suplementarios, sustitutivos del clinker, que no requieren pasar por el proceso pirolítico que tiene lugar en el horno. Generalmente son residuos o subproductos de otros procesos industriales. Es éste el caso de las cenizas volantes, la escoria granulada de alto horno o el humo de sílice. Otros sustitutivos son de origen mineral, como el "filler" calizo (polvo mineral con una

granulometría de gran finura), las puzolanas naturales de origen volcánico, el metacaolín o los esquistos calcinados, si bien también pueden ser de origen vegetal, como la ceniza de cáscara de arroz. Los porcentajes de sustitución varían según el tipo de adición y las propiedades del cemento, pudiendo llegar a ser elevados. Su influencia en las propiedades del cemento puede mejorar aspectos como la resistencia, durabilidad o trabajabilidad (Berndt, 2009; Glavind, 2009; CEDEX 2007a, 2007b, 2009, 2009c, 2009d). La EHE-08 (Ministerio de la Presidencia, 2008) y la Instrucción de Recepción de Cementos RC-16 (Ministerio de la Presidencia, 2016) regulan su empleo en España.

Las **cenizas volantes** son un residuo de la combustión de carbón pulverizado en centrales térmicas, extraídas de la corriente de gases mediante precipitadores electrostáticos. Tienen una granulometría muy fina. Proviene de las partículas inorgánicas contenidas en el carbón, y contienen, entre otros, sílice, alúmina, óxidos de hierro, cal y carbón. Su principal propiedad es la actividad puzolánica, o capacidad para fijar el hidróxido cálcico ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado en la hidratación del cemento portland, a temperatura ordinaria y en presencia de agua. Originan así productos sólidos, insolubles y dotados de resistencia mecánica (CEDEX, 2009c). Los cementos que incluyen cenizas volantes son altamente impermeables, lo que incrementa la durabilidad y la resistencia ante agentes agresivos.

En general no requieren una especial preparación para su adición al cemento; como mucho, podría necesitarse una molienda previa de homogeneización. Al sustituir el clinker por estas cenizas, disminuye el balance energético y de emisiones del cemento. Aunque las cenizas se originan en un proceso de combustión, éste no es tenido en cuenta a efectos de consumo de energía y emisiones de contaminantes, porque las cenizas son un residuo, que en ausencia de aprovechamiento habría que llevar a vertedero. Sí es necesario contabilizar los consumos y emisiones invertidos en su transporte desde los puntos de origen a las fábricas de cemento. En España existen actualmente 18 plantas térmicas de carbón que generan este tipo de residuos.

Las **escorias siderúrgicas** son subproductos de los procesos de fabricación de acero, descritos más adelante en el punto 2.3.11. Estos subproductos son originados por los fundentes que se añaden a las materias primas, que tienen como objeto atrapar las impurezas que no se desea que pasen al metal, separándose por gravedad del arrabio o acero. La escoria procedente del horno alto se emplea como sustitutiva del clinker, incluyendo en su composición cal, sílice, alúmina y otros elementos. Esta escoria se emplea en forma granulada, para lo cual es necesario enfriarla bruscamente, con agua, desde su estado líquido. Posteriormente debe secarse y molerse hasta alcanzar una granulometría similar a la del clinker. Las distancias de transporte en este caso son más importantes que en el de las cenizas volantes, debido a que en España sólo existen altos hornos en Gijón (CEDEX, 2009).

Existen estudios referentes a la utilización como material cementante de escorias de acería eléctrica (CEDEX, 2007b), si bien su empleo no es todavía habitual.

El **humo de sílice** es un subproducto inorgánico de la obtención de silicio metal y de ferrosilicio, en hornos de arco eléctrico. Está constituido por partículas esféricas de gran finura, con un porcentaje muy elevado de dióxido de silicio (SiO_2). Esta gran abundancia de sílice le confiere una gran actividad puzolánica, en presencia de cemento portland hidratado. Para emplearlo como adición en la fabricación de cemento es necesario mezclarlo con agua o someterlo a un proceso de densificado, pues de lo contrario su elevada finura dificulta su transporte. El empleo de humo de sílice permite la obtención de hormigones de altas prestaciones. En España existe una única planta que produce humo de sílice (CEDEX, 2009d).

2.3.9.- Empleo de combustibles alternativos

El aporte de energía térmica a los hornos de fabricación de clinker se realiza tradicionalmente por medio de combustibles fósiles como la hulla, el coque de petróleo o el fuelóleo. Estos procesos de combustión suponen, en importancia, la segunda fuente de emisiones de CO₂, por debajo de las debidas al proceso de descarbonatación, ya comentado. La utilización de combustibles alternativos a los anteriores puede mejorar el perfil de emisiones del cemento o eliminar residuos de procedencias externas, valorizándolos energéticamente. Estos combustibles ya han sido introducidos previamente (residuos forestales, cáscara de arroz, huesos de aceituna, harinas animales, residuos sólidos urbanos, neumáticos fuera de uso, o residuos industriales como disolventes, aceites o pinturas).

Las temperaturas alcanzadas en los hornos de clinker y los tiempos de permanencia a esas temperaturas son suficientes para garantizar combustiones completas y la total destrucción de posibles contaminantes e inquemados (Glavind, 2009; LIS-UDC, 2010). En este sentido, el beneficio ambiental de esta valorización se encuentra no tanto en la reducción de emisiones, sino en la disposición final de materiales peligrosos, que de otro modo tendrían que ser tratados adecuadamente o incinerados con menor seguridad.

El valor calorífico neto de la madera es notablemente inferior al de otros combustibles, y el de otras biomásas es todavía inferior. La gran ventaja de emplear biomasa como combustible en hornos radica en un balance neutro de emisiones de CO₂ tras su combustión. Técnicamente toda reacción de combustión genera una cierta cantidad de CO₂, pero aquí esa cantidad no se tiene en cuenta a efectos de contabilización de emisiones (Parlamento europeo, 2003). Se entiende que el CO₂ liberado es el capturado por el organismo del que procede la biomasa durante su vida; es decir, con la combustión se cierra el ciclo del carbono en un plazo relativamente corto. Se considera biomasa a efectos de factor de emisión de CO₂ nulo, entre otros, los siguientes materiales: madera usada y residuos de madera, harinas cárnicas, grasas y aceites vegetales y animales, y lodos de depuradoras (Comisión Europea, 2007). No obstante, a pesar del posible balance neutro de emisiones de CO₂, conviene evitar consideraciones demasiado benevolentes para con la combustión de biomasa, ya que ese balance neutro no existe para el resto de contaminantes (SO_x, NO_x, entre otros).

Los neumáticos fuera de uso (NFU's) son un residuo abundante debido a su elevada tasa de generación por parte de la automoción. Están compuestos mayoritariamente por cauchos naturales y sintéticos, negro de carbono y elementos metálicos. Pueden ser valorizados en los hornos de clinker. Su poder calorífico y factor de emisiones (28 TJ/Gg y 85 tCO₂/TJ, respectivamente) los colocan cerca de la hulla, aunque con emisiones de CO₂ más bajas, debido al menor contenido en carbono. Se ha comprobado experimentalmente que se puede sustituir hasta un 20% del combustible de los hornos de calcinación por NFU's (CEDEX, 2007c), resultando un clinker muy similar al obtenido mediante el empleo de combustibles tradicionales.

En la Tabla T2.1 se muestran los valores caloríficos netos y factores de emisión de diversos combustibles convencionales y alternativos.

Combustible	Valor calorífico neto (GJ/t)	Factor de emisión (tCO ₂ / TJ)
Coque de petróleo	32,5	97,5
Fuelóleo	40,4	77,3
Hulla	25,8	94,5
Gasóleo	43	74
Biomasa (madera)	15,6	0
Otras biomásas sólidas	11,6	0
Aceites usados	40,2	73,3
Neumáticos fuera de uso	28 (*)	85

Tabla T2.1: Valor calorífico neto y factores de emisión para combustibles empleados en hornos de clinker (Comisión Europea,2007; (*) CEDEX, 2007c).

2.3.10.- Descripción del sector del cemento en España

La primera patente del cemento Portland data de 1824. La producción industrial de cemento, iniciada durante la segunda mitad del siglo XIX, ha mantenido un progresivo crecimiento a nivel mundial desde los años 50 del siglo pasado. En el año 2006 la producción mundial se elevó a 2.560 millones de toneladas, de las cuales casi la mitad (más del 47%) se produjeron en China; en la Unión Europea se fabricaron 267 millones (Schorcht et al., 2013). En ese mismo año las plantas españolas produjeron 54 millones de toneladas, lo que supuso el 20% de toda la producción de la UE. El consumo en España ascendió a 55,9 millones de toneladas, durante dicho año, según la Asociación de Fabricantes de Cemento de España, OFICEMEN (2007). La referida producción mundial se correspondió con un máximo del consumo per cápita, alcanzando los 1.278 kg / habitante, según la Federación Interamericana de Cemento, FICEM (2012).

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

Tras unos comienzos con un crecimiento moderado, como corresponde a la introducción de un nuevo producto en el mercado, la industria del cemento se desarrolló de una forma paralela a los ciclos económicos del país. Su primer gran impulso tuvo lugar en la década 1920-30, con motivo de la expansión económica y de los grandes proyectos de infraestructuras públicas de aquella época, durante la cual se pasó de 19 a 30 fábricas en operación, y se incrementó notablemente la producción, pasándose de 170.892 t en 1910, a 318.635 t en 1920, y a 1.533.442 t en 1930. A este desarrollo siguió una década de caída y estancamiento, correspondiente a la crisis mundial iniciada en 1929 y, posteriormente, a la Guerra Civil española de 1936-39. Durante la posguerra el crecimiento fue muy lento, a pesar de la demanda de materiales para la reconstrucción. Así, por ejemplo, la producción en 1944 y 1945 fue muy similar a la de 1930. Esto se debió a la precariedad

general del país, a la escasez de suministros energéticos y materiales, a la falta de divisas y a las trabas a las importaciones de maquinaria y repuestos. Posteriormente, al igual que el conjunto de la economía española, entre 1950 y la primera crisis del petróleo, acaecida durante la década de los 70, la industria del cemento vivió una gran etapa de crecimiento paralelo al del conjunto de la economía española, pasando de 2.042.647 t en 1950 a 5.058.194 t en 1960, a 16.002.659 t en 1970 y a 28.846.552 t en 1978. La crisis de los 70 impulsó a los fabricantes de cemento españoles a exportar parte de su producción cuando disminuyó la demanda interna, alternativa que ha continuado empleándose hasta la actualidad. Tras diversas fluctuaciones en la producción, registradas entre finales de los años 70 y principios de la década de 1990, desde 1992 (23.652.213 t) se registró una fuerte tendencia al alza, que marcó los primeros años del siglo XXI. De esta forma se alcanzaron los máximos históricos de producción de cemento en 2006 (54.000.000 t) y 2007 (54.500.000 t), comenzando a partir de 2008 (42.100.000 t) un acusado descenso, enmarcado en el actual contexto económico nacional e internacional. En 2011 la producción fue de 22.200.000 t, cifra que ya se había alcanzado por primera vez en 1974.

Las materias primas necesarias para la producción de cemento, principalmente, calizas y margas, son relativamente abundantes y de fácil acceso en la mayor parte de la península ibérica, por lo que su disponibilidad no ha supuesto, históricamente, un condicionante para la localización de las fábricas. En cambio, sí ha sido mucho más determinante el coste del transporte del producto. El coste por unidad de masa del cemento es relativamente bajo, estando entre los 80 y los 150 €/t en 2012, dependiendo del tipo de cemento (COAATGU, 2013). Por ello su transporte por carretera supone una parte importante de su precio final, y no suele ser rentable efectuarlo a distancias muy superiores a los 200 km (Rosado, 1997; Ministerio de Medio Ambiente, 2004). Para efectuar exportaciones o grandes expediciones, la vía marítima es la preferida. Por ello, ya desde sus inicios, las fábricas de cemento españolas se situaron en el entorno de los principales centros de consumo, fundamentalmente en grandes ciudades y zonas industriales y, preferentemente, en la costa.

La naturaleza del proceso y de las instalaciones necesarias para llevarlo a cabo llevan a que el sector cementero sea muy intensivo en capital. Según el Ministerio de Medio Ambiente (2004), la inversión necesaria para la construcción de una fábrica equivale aproximadamente a la facturación de 3 años, lo que supone una barrera de entrada para nuevos competidores. También son características del sector su elevada concentración económica, definida por el número de empresas que componen una industria y la distribución de sus tamaños, y una importante integración vertical, tanto aguas arriba (canteras y áridos) como aguas abajo (hormigones, morteros, prefabricados de hormigón) (Cajamar, 2005). Las ventas de cemento se realizan principalmente por cuatro canales: empresas hormigoneras (de hormigón preparado), empresas de prefabricados, empresas constructoras como cliente directo, y almacenistas intermedios. En 2011, según OFICEMEN (2012), más de la mitad de las ventas se realizaron a empresas hormigoneras. La expedición se realiza a granel, sobre todo para empresas hormigoneras y prefabricadoras, o en sacos, que constituyen el formato mayoritario para las ventas a almacenistas intermedios.

A nivel empresarial, y como se ha indicado anteriormente, algunas firmas todavía existentes, o que existían hasta hace pocos años, nacieron con la propia industria española del cemento. Es el caso de Sociedad Anónima Tudela-Veguín (Oviedo, 1898), Hijos de José María Rezola (Guipúzcoa, 1901), Compañía General de Asfaltos y Portland Asland (Barcelona, 1904), Cementos Portland (Navarra, 1905), Sociedad Financiera y Minera (Málaga, 1921), Cementos Cosmos (León, 1924), o Portland Valderribas C.M.A. (Madrid, 1925), entre otros. A lo largo de más de un siglo de historia, han sido habituales las operaciones de absorción e integración de pequeñas compañías, conformando grupos

empresariales con varias fábricas. A finales de la década de los 80 del siglo XX comenzaron a introducirse en el mercado español, por la vía de la adquisición de instalaciones existentes, grandes grupos cementeros multinacionales. En 2010 operaron en España 35 fábricas integrales, de las cuales 8 pertenecían a Cementos Portland Valderribas, 7 a Cemex España, 5 a Holcim, 4 a Cimpor, 3 a Italcementi, 3 a Lafarge-Asland y 3 a Tudela-Veguín. Cementos Balboa y Cementos Molíns poseen una fábrica cada una. En 2003, los 4 primeros operadores aglutinaron más del 60% del mercado, lo que demuestra la característica concentración del sector (Cajamar, 2005), ya aludida. A nivel mundial, los principales productores son Lafarge, Holcim, Cemex, Heidelberg Cement e Italcementi (Schorcht et al., 2013).

En 2010 las 35 plantas españolas en funcionamiento contaban con un total de 57 hornos de clinker. De ellos, 54 eran de vía seca. A nivel europeo, en 2008 existían 268 plantas integrales en la UE, siendo de vía seca el 90% de ellas. La tendencia de las instalaciones de vía húmeda, semihúmeda y semiseca es su conversión a vía seca una vez que tenga lugar su próxima renovación (Schorcht et al., 2013). Según el Ministerio de Medio Ambiente (2004), la Mejor Tecnología Disponible en la actualidad, para el caso general, es un horno de clinkerización rotatorio dotado de precalentador de ciclones multietapa y precalcinador, con un consumo energético aproximado entre 2,9 y 3,2 GJ por tonelada de clinker. La capacidad típica actual de las plantas europeas es de 3.000 toneladas / día (del orden de 1.000.000 t/año). En España existe todavía un número considerable de instalaciones de menor capacidad. Durante la última década se han registrado fuertes inversiones en las plantas existentes, encaminadas a incrementar la capacidad de producción y mejorar el desempeño ambiental de las instalaciones. Al margen de las operaciones de compra por parte de los grandes grupos para incrementar sus cuotas de mercado, también ha sido característica, durante los años de incremento de la demanda, la entrada de nuevos competidores con instalaciones de ciclo no completo, con plantas de molienda que producen cemento a partir de clinker importado (Cajamar, 2005). Este tipo de plantas permiten superar una de las principales barreras de acceso del sector, que son los costes de instalación inicial, como se indicó anteriormente. En 2010 existían al menos 10 plantas de este tipo en España y 90 en toda la UE. La mayor parte de las importaciones de clinker para estas plantas de molienda provienen de Turquía, Europa del Este y Asia.

2.3.11.- Aspectos principales de la fabricación del acero

Existen dos vías principales para la producción industrial de acero. En 2011 el 69,7% de la producción mundial se fabricó en plantas BOF (*Blown Oxygen Furnace*) o integrales (World Steel, 2013), en las que el mineral de hierro es reducido con carbón en un alto horno para dar lugar a un producto intermedio, llamado arrabio, a partir del cual se obtienen los distintos tipos de acero primario. El resto de la producción se efectúa en acerías eléctricas o EAF (*Electric Arc Furnace*), en las que se produce acero reciclado mediante la fusión de chatarra y aleantes, en un horno de arco eléctrico. Al ser el acero un material de alta intensidad energética, su reciclaje es muy ventajoso energética y medioambientalmente, como se reflejará en el presente documento.

Los aceros de mayor calidad necesitan ser producidos, en general, en las plantas integrales. Estas plantas son grandes complejos industriales, con un volumen de producción y de mano de obra muy elevados, que integran varias fábricas diferentes: plantas de coque, de sinterizado, altos hornos, instalaciones de laminación, entre otras.

Las plantas EAF suelen tener un tamaño mucho menor a las anteriores; la calidad de su acero está condicionada por la calidad de la chatarra cargada en el horno como materia prima. Es posible mejorar esta calidad mediante operaciones de afino, aunque el incremento de coste que ello supone puede hacer que resulte poco rentable frente al proceso integral. Estas plantas pueden emplear también como materia prima productos primarios, como el arrabio o los prerreducidos de hierro (DRI). Se llama prerreducidos al resultado de triturar la mena de hierro para someterla después a un proceso de reducción directa en fase sólida, en el seno de un reactor específico, empleando determinados agentes reductores, como el gas natural o el carbón, con objeto de eliminar algunos elementos no convenientes para la fusión del hierro. Según fuentes del sector que se han consultado, la carga de productos de alta calidad en los hornos eléctricos se reduce a lo imprescindible para evitar un empobrecimiento progresivo de la mezcla, siendo en todo caso un porcentaje muy pequeño del total.

Al igual que sucede con la estructura metálica usada en la construcción, los aceros empleados en la fabricación de armaduras, alambres y cables para estructuras de hormigón armado y pretensado requieren en sus especificaciones menores contenidos de elementos de aleación que los destinados a otros usos, como es el caso de la industria del automóvil. Por ello son producidos mayoritariamente en plantas eléctricas. En España, este porcentaje puede llegar al 100%, dado que la única planta integral existente está orientada a la fabricación de productos planos.

En nuestro país la industria siderúrgica comenzó su andadura a principios del siglo XX (Cuesta, 2006), aprovechando la existencia de cuencas de carbón en el norte, y de yacimientos de mineral de hierro en diversos puntos de España. La primera planta integral española fue Altos Hornos de Vizcaya, fundada en Sestao en 1902. Al mismo tiempo, existían ya plantas de horno eléctrico. En 1950 se fundó con capital público la Empresa Nacional de Siderurgia (Ensidesa), que construyó una planta integral en Avilés. Posteriormente fueron construidos nuevos complejos en Gijón (Unisa) y en Sagunto (Altos Hornos del Mediterráneo). La siderurgia integral se enfrentó a una grave crisis y a un largo proceso de reconversión desde finales de la década de 1970, que finalizó con la desaparición de todos los altos hornos existentes en España, salvo los de Gijón, que fueron modernizados y tienen en Avilés la etapa siguiente de su proceso. Actualmente estas instalaciones pertenecen al grupo Arcelor-Mittal.

Paralelamente al declive de la siderurgia integral, las instalaciones de horno eléctrico cobraron mayor importancia que en otros países, ya desde los años 70 del siglo XX (Navarro, 2004). Al ser mucho menores sus costes de implantación y sus tamaños mínimos de producción, se adaptaban mejor a las capacidades financieras de los empresarios españoles y al tamaño del mercado, resultando más competitivas que los altos hornos para la producción de productos largos de calidades medias y bajas. En la actualidad, disponen de plantas de este tipo los grupos Arcelor-Mittal (en Zaragoza, Madrid y País Vasco), Celsa (en Cataluña y País Vasco), Megasa Siderúrgica (Galicia), Balboa (Extremadura) y Siderúrgica Sevillana, de los cuales los tres primeros fabrican redondos corrugados. Existen además varias plantas dedicadas a la producción de aceros especiales.

La producción de acero, en miles de toneladas, a nivel nacional, europeo y mundial en 2003, 2007 y 2011 (World Steel Association, 2013) se muestra en la tabla T2.2. Destaca como característica del sector en España la elevada importancia de la producción de plantas eléctricas frente a las integrales, a diferencia de lo que ocurre a nivel europeo y mundial. También se observa que, tanto a nivel español como europeo, se ha producido un acusado descenso de la producción entre 2007 y 2011, a

causa de la persistente crisis económica. En el caso de los aceros corrugados, la producción en 2011 fue del orden del 50% de la de 2007. Estos descensos, sin embargo, no se dan a nivel mundial.

Ámbito		2003	2007	2011
España	Acero total	16.286	18.999	15.504 (24,8% BOF – 75,2% EAF)
	Corrugados	3.383	4.523	2.355
UE-27	Acero total	192.511	210.179	177.652 (58,5% BOF – 41,1% EAF)
	Corrugado	16.612	20.651	9.547
Mundial	Acero total	969.915	1.347.007	1.518.299 (69,7% BOF – 29,1% EAF)
	Corrugado	81.299	114.181	131.974

Tabla T2.2.- Producción de acero total y productos largos corrugados, en miles de toneladas. Fuente: World Steel, 2013.

Siendo la energía eléctrica el principal consumo energético en este proceso, las emisiones gaseosas asociadas al mismo dependerán fuertemente del “mix energético” del país en el que se ubique la factoría.

2.3.12.- Aspectos principales de la producción de áridos

El 99% de los áridos empleados en construcción son de origen natural, mientras que la pequeña fracción restante procede del reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) o de escorias generadas en otros procesos industriales (Asociación Nacional de Fabricantes de Áridos, ANEFA, 2013).

Los métodos de producción de áridos difieren en el modo de explotación de los yacimientos, según se trate de materiales sin consolidar (graveras, donde se emplean únicamente medios mecánicos) o de bancos de roca masiva (canteras, en las que se recurre a voladuras con explosivos previas al uso de equipos mecánicos). A partir de este punto ambos tipos de instalaciones tienen un funcionamiento similar, transportando el material mediante camiones o cintas transportadoras hasta una planta de tratamiento en la que suceden diferentes etapas de trituración, clasificación y lavado, en función del tamaño y la calidad requerida al producto final. Habitualmente una planta produce áridos de diferentes tamaños o granulometrías, según la demanda existente en la zona, siendo más elevado el precio a medida que aumenta el grado de molienda.

Los equipos móviles empleados son del mismo tipo que los habituales en movimientos de tierras (palas cargadoras, dumpers, camiones, etc.), accionados por gasóleo. Los sistemas integrados en la planta (cintas, machacadoras, cribas, etc.) utilizan energía eléctrica para su funcionamiento o, alternativamente, gasóleo (véanse ANEFA, 2013b y Tiktin, 1998). No es habitual que se empleen otros suministros energéticos al margen de los anteriores.

Las explotaciones de áridos afectan al medio ambiente en diferentes modos: por agotamiento de recursos naturales, por alteración o contaminación de aguas superficiales o subterráneas, por generación de ruido, vibraciones y polvo, por impacto visual y por afección a fauna y flora, entre otros aspectos (ANEFA, 2013b). En esta Tesis, con el propósito de dar un tratamiento homogéneo al de los demás aspectos implicados en el ciclo de vida del hormigón, se estudian únicamente el consumo de energía y las emisiones de CO₂ y otros contaminantes en las diferentes etapas del proceso.

En otros sectores, como en la producción de cemento o de acero, se necesitan instalaciones industriales de gran tamaño y complejidad técnica, lo que ocasiona un número reducido de competidores y un precio elevado de sus productos, que hace rentables los transportes a largas distancias. Las instalaciones de producción de áridos son más sencillas, operan con menos personal y explotan yacimientos abundantes en toda la geografía española. Existe un gran número de explotaciones, condicionado por las circunstancias del transporte. Éste se realiza casi en su totalidad por carretera (ANEFA, 2013b), y sus costes pueden llegar a superar el coste de producción del árido. Transportes a distancias mayores de 50 km no son habituales (pueden suponer menos del 5% de los casos) debido a su baja rentabilidad, por lo que el mercado de áridos es predominantemente local.

2.3.13.- Aspectos principales de las plantas de hormigón preparado

Las plantas de hormigón preparado tienen como objeto mezclar, en las proporciones adecuadas, según la prescripción concreta para cada caso, los componentes que forman parte del hormigón (cemento, áridos, agua y aditivos) y cargar éste en los medios de transporte que lo trasladarán hasta su punto de utilización en obra.

Existen diferentes tipos de planta de hormigón, en función de sus características y tamaños (Tiktin, 1998). Estas instalaciones se encuentran distribuidas por toda la geografía española, dado que su radio de acción viene limitado por el tiempo máximo de permanencia del hormigón fresco en la cuba de transporte, que es de 1,5 horas (OFICEMEN – ANEFHOP, 1978).

El número de plantas registradas era de 2.263 en 2006 (CEDEX, 2007d), año en el que se registró el máximo histórico de producción de hormigón en nuestro país (97.761.000 m³; ANEFHOP, 2013). A partir del tercer trimestre de 2007 comienza un descenso acusado de la producción, que en 2012 fue de 21.577.000 t, dentro del adverso contexto general que la economía española tuvo durante ese periodo. Esta situación conllevó el cierre de numerosas plantas. En el portal de la patronal del sector, ANEFHOP, se indica que en 2013 se encontraban activas 282 empresas; normalmente cada una de ellas dispone de varias plantas, en algunos casos se trata de grandes grupos con un número elevado de instalaciones.

A grandes rasgos, puede describirse una planta de hormigón genérica del siguiente modo:

- La instalación dispone de almacenamiento para los áridos, habitualmente al aire libre, y para el cemento, que se almacena en silos. Los aditivos se almacenan en tanques.
- Los componentes se mezclan con agua en una amasadora, según una dosificación predeterminada por la planta, en función de las prestaciones requeridas al hormigón. Para conseguir las proporciones adecuadas se dispone de básculas para los distintos componentes. No es frecuente que el proyectista defina la dosificación, si bien puede suceder en algunos casos, sobre todo de estructuras especiales.
- La mezcla fresca se carga en el camión cuba, que se encargará del transporte a obra.
- Puede existir la posibilidad de cargar en seco el camión y añadir el agua posteriormente. Este es el caso de las plantas que no tienen amasadora (plantas de dosificado), en las cuales el camión hormigonera hace las veces de aquella, homogeneizando los

componentes para luego amasar, tras añadir el agua y los aditivos. Por supuesto, hay plantas que tienen amasadora, con la cual se prepara todo el producto que se sirve (plantas de amasado). También hay plantas combinadas, cuya amasadora tiene un sistema de desviación (*by-pass*), que permite ambos tipos de amasado, en camión y amasadora, simultáneamente.

- Se toman probetas para controlar la calidad del hormigón producido.
- El agua empleada puede proceder de captaciones propias o del exterior. Las plantas pueden disponer de sistemas de reciclaje del agua de lavado de las cubas y de los residuos de hormigón generados.
- Estas instalaciones pueden ser operadas por una plantilla muy reducida, dado su nivel de automatización.
- Existen también plantas móviles o temporales, que pueden instalarse en obra y evitar transportes por carretera. Son rentables si la cantidad de hormigón a emplear va a ser considerable, por encima de 25.000 m³, según indica un empresario del sector que ha sido consultado.
- La energía empleada es eléctrica. La potencia depende del tamaño y capacidad de la planta.

2.3.14.- Aspectos principales del transporte de hormigón fresco

Habitualmente el transporte de la masa fresca entre las plantas de hormigón y el emplazamiento de la obra se realiza por carretera, mediante auto-hormigoneras. Se trata de camiones dotados de una cuba giratoria en la que el hormigón se amasa en continuo durante el viaje. La limitación del tiempo de permanencia en la cuba a 1,5 horas, ya mencionada, tiene el propósito de evitar el inicio del fraguado antes del vertido del hormigón. Esto acota la distancia máxima de transporte que puede ser cubierta con garantías. Probablemente esa distancia no va más allá de los 60-80 km en el mejor de los casos. Dependiendo de las limitaciones de velocidad de las infraestructuras viarias, de los problemas de tráfico, y de las colas de espera de camiones que se pueden producir en las obras de mayor tamaño, estas distancias suelen ser sensiblemente menores que las que se acaban de mencionar.

La cuba puede ser accionada por el propio motor del camión, o ir montada sobre un semirremolque que incorpore un motor independiente. En ambos casos el combustible empleado es gasóleo, y los consumos dependerán de la capacidad del tambor. Se puede encontrar una descripción más detallada de estos equipos en Tiktin (1998).

2.3.15.- Puesta en obra del hormigón

Una vez que el hormigón llega a la obra, las características de la misma y de los elementos estructurales que se van a ejecutar condicionarán los trabajos a realizar y los equipos empleados para ello. Por este motivo no es sencillo establecer una generalización a este respecto. Para alcanzar

el objetivo de este trabajo, se ha decidido tener en cuenta las operaciones de bombeo y vibrado del hormigón, dado que ambas son comunes a gran parte de las obras actuales.

El bombeo de hormigón permite llegar a puntos de vertido más allá del alcance de la auto-hormigonera, tanto en horizontal como en vertical, y conseguir que el reparto del material en fresco sea más uniforme. Para ello se emplean bombas estacionarias o móviles, en este último caso montadas sobre camión o remolque. Existen también auto-hormigoneras que incorporan su propia bomba.

El vibrado es necesario para homogeneizar la mezcla, una vez vertida dentro de los encofrados, con objeto de asegurarse de que no se formen coqueas en el seno del hormigón, y de que no se acumulen áridos en determinadas zonas. Un vibrado ineficiente o escaso puede ser la causa de problemas de durabilidad posteriores. Existen diferentes tipos de vibradores, aunque en general se trata de equipos portátiles de pequeño tamaño y potencia, dada su utilización manual. Los hormigones autocompactantes, muy usados hoy en día en la prefabricación, no suelen necesitar vibrado.

El campo de la prefabricación merece una mención aparte. Elaborando los elementos estructurales en una planta industrial es posible optimizar el diseño (dosificación, armaduras, pretensado, etc.) y mejorar los procesos de producción (encofrado, curado, compactación, etc.), obteniendo de este modo productos de gran calidad. En estos casos se evita el transporte de hormigón fresco (la planta de hormigón está en la propia instalación), siendo en cambio necesario el transporte de productos terminados (en algunos casos, recurriendo a transportes especiales, debido a las dimensiones de las piezas). Aunque gran parte del proceso tenga lugar en la fábrica, siempre existirá una inexcusable fase de puesta en obra, en este caso focalizada en el montaje de los elementos en su emplazamiento definitivo. Durante el desarrollo de la presente Tesis se han contemplado las consecuencias de todo lo dicho, si bien los análisis realizados no son tan profundos como los efectuados para el resto de aspectos.

2.4 ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

2.4.1.- Introducción

Con carácter general, se pueden contemplar tres enfoques diferentes en la intersección de la economía con la sostenibilidad (Montalvo, 2002). El primero de ellos es lo que se conoce como economía ambiental, que analiza las formas de explotación y administración óptimas de recursos. Se incluye dentro de ella el estudio de las fuentes de escasez y de los posibles abusos, y en particular los problemas derivados de la contaminación. En este sentido se han creado impuestos ambientales, se han establecido mercados de derechos de emisión y se ha estudiado la valoración económica de recursos naturales.

El segundo enfoque contempla que el crecimiento económico equilibrado es un requisito imprescindible para el desarrollo sostenible (economía política), estableciendo como condición previa para el funcionamiento de un sistema el que éste sea viable económicamente (crecimiento equilibrado y sostenido), paralelamente a los restantes condicionantes ambientales y sociales.

Por último, el tercer enfoque se ha desarrollado como el estudio integrado de los tres pilares de la sostenibilidad, ante la insuficiencia de los dos modelos anteriores para abordar determinados problemas globales de gran alcance, como puede ser la lucha contra el cambio climático o la disminución de las desigualdades. Los problemas globales afectan a bienes públicos de naturaleza universal, y su resolución no es posible sin una acción conjunta e igualmente global; de lo contrario, los daños ambientales y sociales se trasladarían también a los sistemas económicos.

Existen numerosos modelos analíticos de estudio del crecimiento económico, que en las últimas décadas han ido incorporando el concepto de la sostenibilidad a sus formulaciones. Pulido (2003) realiza una revisión de los mismos que excede el alcance de esta Tesis, al centrarse en el ámbito de estudio de las ciencias económicas. No obstante, merece la pena señalar algunas de las ideas mencionadas en dicho artículo.

El estudio del crecimiento económico en términos de sostenibilidad comenzó a partir de los análisis realizados en torno a un informe de 1972 (Meadows et al., 1972) relativo a los límites del crecimiento. En 1977 John M. Hartwick afirmó que la sostenibilidad económica se garantiza si la renta derivada de la disminución de recursos coincide con el nivel de inversión necesario para alcanzar un consumo constante en el tiempo. Este enfoque se ha denominado “regla de la sostenibilidad débil de Hartwick” y, de acuerdo con él, para que un gobierno pudiera garantizar la sostenibilidad de su sistema económico, debería invertir las rentas derivadas de la destrucción de recursos en construir capital para el resto de la economía.

Posteriormente, en 1990, Hermann Daly propuso una definición de “sostenibilidad fuerte” con la intención de superar a la anterior, que consideraba insuficiente. Según Daly, para garantizar la sostenibilidad sería necesario (i) que las tasas de explotación de los recursos se igualen a las de regeneración (rendimiento sostenido), (ii) que las tasas de emisión de residuos se igualen a la capacidad de asimilación natural del ecosistema, y (iii) que las fuentes renovables de energía se exploten de forma casi-sostenible, limitando su tasa de destrucción a la de creación de sustitutos. Esta definición no admite sustituir indefinidamente capital natural por capital fabricado, ya que ambos son complementarios más que sustitutivos.

Trabajos posteriores han introducido conceptos como la eficiencia dinámica, como nivel de consumo que maximiza el bienestar, y la equidad intergeneracional, como exigencia de que el bienestar maximizado no decrezca en el tiempo. Por último, es interesante la consideración de que puede existir una “insostenibilidad exportada” a través del comercio exterior de recursos naturales y de bienes intensivos en consumo de recursos.

2.4.2.- La sostenibilidad económica en las estructuras de hormigón

Los aspectos tratados en el epígrafe anterior sirven para enmarcar el problema económico dentro del estudio de la sostenibilidad, si bien su aplicación directa a la ingeniería de la construcción no resulta sencilla.

En construcción, una de las principales herramientas para estudiar la vertiente económica de la sostenibilidad es el análisis del coste del ciclo de vida (García et al., 2015), similar en concepto al ACV ambiental introducido en la sección 2.3.2. Este tipo de análisis se puede apoyar en la norma ISO 15686-5 (ISO, 2008), y será tratado en mayor profundidad en el capítulo 8. Como se verá en dicho capítulo, teniendo en cuenta lo dilatado en el tiempo que puede ser el ciclo de vida de edificaciones e infraestructuras, más que el coste total a lo largo de todo ese ciclo de vida, el parámetro más definitorio del desempeño económico de una construcción será su coste anual equivalente (Gjorv, 2009).

El coste anual equivalente está fuertemente condicionado por la vida útil del proyecto, motivo por el cual la durabilidad se erige como una variable clave, aunque no sea la única, en la sostenibilidad económica del proyecto. Se ha decidido incluir en los epígrafes siguientes de este capítulo un resumen de las diferentes fuentes consultadas en cuanto a los aspectos técnicos de la durabilidad de las estructuras de hormigón. En el capítulo 8 se abordan otros aspectos económicos de las estructuras y se discute el papel real de la durabilidad en la evaluación de la sostenibilidad.

2.4.3.- La estrategia de durabilidad en la EHE-08

A pesar de no hacerse explícito, se puede decir que la durabilidad se contempla en el Anejo 13 como un factor económico, pues conforme crece el periodo de vida útil de una estructura, aumenta también el tiempo de que se dispondrá para amortizarla; por tanto, su impacto económico será menor. Debe tenerse también en cuenta que la durabilidad es un factor que influye en lo ambiental: un incremento de la vida útil aumenta el período durante el cual no se volverá a generar un ataque importante el medio ambiente, en relación con la estructura bajo estudio.

La EHE-08 introduce el denominado “coeficiente de contribución por extensión de vida útil”, **b**, cuyo valor máximo está limitado a 1,25. Esto se hizo para evitar que se pudieran obtener puntuaciones altas solamente en base a este parámetro, desatendiendo otros aspectos de la sostenibilidad. Este coeficiente **b** representa la relación entre la vida útil realmente contemplada en el proyecto y la vida útil mínima indicada en el artículo 5 de la EHE-08.

En la definición del coeficiente **b** no se valoran las diferentes alternativas a la hora de conseguir una mejora de la durabilidad, ni se especifica el modo de estimar la vida útil. El Anejo 9 de la EHE recoge

varios modelos de durabilidad en relación a la corrosión de las armaduras, que no contemplan otros mecanismos de deterioro.

El artículo 37 de la EHE-08 contempla la adopción, tanto en la fase de proyecto como en la de ejecución, de una estrategia de durabilidad que permita alcanzar los objetivos mínimos de vida útil marcados por el artículo 5. A mayor desarrollo y exigencia de dicha estrategia de durabilidad, corresponderá un mayor margen de seguridad sobre la vida útil mínima, y por lo tanto una mayor extensión de la vida útil. En los epígrafes siguientes se detallan los aspectos considerados por la EHE-08, y también algunos otros que no se incluyen en ella, y que resultan de interés.

2.4.4.- Selección de formas estructurales adecuadas

Se incide especialmente en que el diseño de la estructura y de sus detalles constructivos evite, en la medida de lo posible, la penetración y acumulación de agua. En este sentido, del Ríó (2008), hace referencia a estudios sobre patologías estructurales que indican que un porcentaje predominante de estructuras que han precisado intervenciones de reparación en España, presentaban errores de proyecto o diseño. Sin embargo, este aspecto no se evalúa en el modelo de sostenibilidad de la EHE.

2.4.5.- Calidad adecuada del hormigón

Además de las exigencias establecidas en otros apartados de la EHE-08 para las materias primas incorporadas al hormigón, resulta necesario que la dosificación del mismo sea acorde a las clases de exposición a las que va a estar sometida la estructura. Se especifica un contenido mínimo en cemento, una relación máxima agua / cemento (a/c) y una resistencia mínima, según la clase de exposición y el tipo de hormigón (tablas 37.3.2.a y 37.3.2.b de la EHE). Cuanto mayor sea el contenido en agua del hormigón, mayor será la porosidad del mismo una vez endurecido, motivo por el que las relaciones a/c elevadas son contraproducentes desde el punto de vista de la durabilidad. Para ambientes agresivos los valores de los parámetros indicados en las tablas aludidas son menos exigentes que los propuestos por publicaciones especializadas como Al-Rabiah et al. (1990) o Gjorv (2009). Así, por ejemplo, para la clase IIIc, marina en carrera de mareas, la EHE establece una relación a/c máxima de 0,45 y un contenido mínimo en cemento de 350 Kg/m^3 , mientras que los autores mencionados proponen para este último aspecto cifras de $390\text{-}420 \text{ Kg/m}^3$ de cemento.

El empleo de adiciones en el hormigón o en el cemento está considerado en la EHE-08, si bien no se entra a valorar la adecuación de sus efectos a los objetivos de durabilidad. Existen multitud de referencias dedicadas al estudio de los mismos. Según se indica en Polder (1996), la adición a la matriz cementante de materiales hidráulicos o puzolánicos (escorias siderúrgicas, cenizas volantes, humo de sílice) puede incrementar la resistencia a la penetración de cloruros, responsables de la corrosión de las armaduras, gracias al refinado de la estructura porosa del hormigón endurecido. Además de una penetración de cloruros más lenta que en hormigones convencionales, se obtendrían valores críticos de cloruros (a partir de los cuales comenzaría la corrosión) similares o inferiores a los del hormigón ordinario. Del mismo modo, una vez comenzada la corrosión, la velocidad de ésta sería similar o inferior a la registrada en el hormigón sin adiciones. El desarrollo de una menor resistencia a edades tempranas, una mayor sensibilidad ante el proceso de curado y una dosificación más crítica en lo relativo a la trabajabilidad, se encontrarían entre las posibles desventajas.

Según el tipo de adición, los hormigones que incluyen escorias siderúrgicas se reconocen como los que muestran un mejor comportamiento en entornos marinos. Osborne (1999) reseña que los hormigones fabricados con cemento con elevado porcentaje de escoria muestran elevadas resistencias a la penetración de iones cloruro (Cl^-), de consecuencias ya comentadas, y al ataque de iones sulfato (SO_4^{2-}), agresivos con el hormigón y presentes en el agua de mar. Por contra, estos hormigones son vulnerables a los efectos de un mal curado y a los ciclos de hielo y deshielo, y en ambientes muy secos pueden sufrir mayor carbonatación que el hormigón ordinario.

En cuanto a las cenizas volantes, de acuerdo con Molina (2008), Garcés et al. (2010), y Aponte et al. (2012), su relación con la durabilidad no es tan directa como la de la escoria siderúrgica. Molina (2008) revisa numerosos estudios anteriores, al tiempo que realiza una campaña experimental. La conclusión más general que se puede extraer es que el comportamiento del hormigón con cenizas volantes depende de las características del cemento y de la propia adición. Incluso empleando cementos de igual designación (CEM I 42.5R en el estudio) las diferencias de composición y propiedades entre muestras de dos fábricas diferentes (relación C3S/C2S y finura de molienda) pueden hacer que las propiedades del hormigón difieran considerablemente. En mezclas adecuadas, la adición de ceniza puede reducir la porosidad total y la penetración de cloruros, así como disminuir la profundidad de penetración de agua bajo presión e incrementar la resistencia mecánica. Por el contrario, en otros casos la ceniza puede reducir la reserva de alcalinidad del hormigón, disminuyendo la protección pasiva del acero, y provocar una mayor profundidad de carbonatación. También se ha detectado que la permeabilidad podría no mejorar, o incluso empeorar.

Según Gjørv (2009), mientras que las escorias siderúrgicas son ligantes hidráulicos, la mayoría de las cenizas volantes son materiales puzolánicos, cuyos efectos dependen de la cantidad de dihidróxido cálcico ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) disponible para reaccionar. En este último caso la reacción con la ceniza provocará una menor cantidad de cal libre en la matriz cementante endurecida, lo que puede acarrear consecuencias favorables en cuanto a la difusión de cloruros, por modificación de la composición química. Sin embargo, también puede ocasionar pérdida de la alcalinidad del medio, con disminución de la protección del acero. Se ha comprobado que existen porcentajes de sustitución límites, a partir de los cuales un mayor reemplazo de cemento no implica mejoras adicionales en la resistencia a la penetración de cloruros. Este límite es más alto en el caso de la escoria siderúrgica, donde se puede llegar a sustituciones del 70%, que en el de las cenizas volantes, cuyo límite se encontraría en torno al 30%, según los autores previamente citados.

La adición de humo de sílice, en cantidades en torno al 10% del contenido en cemento, no implica por sí sola una mejora de las propiedades de durabilidad, aunque sí puede incrementar la eficacia de cenizas o escorias si se utiliza en combinación con éstas.

Al margen de la corrosión de la armadura de acero, existen otros procesos de degradación que afectan directamente al hormigón. Ante el ataque por sulfatos, los cementos que incorporan escorias o materiales puzolánicos producen estructuras más duraderas que los cementos puros. En estos últimos se producen grandes cantidades de hidróxido de calcio durante la hidratación, y este constituyente presenta una solubilidad elevada ante los sulfatos. Para hormigones expuestos a sulfatos o a ambiente marino (exposiciones IIIb, IIIc), la Instrucción RC-16 (Ministerio de Presidencia, 2016) recoge prescripciones adicionales para la composición de los cementos empleados.

La EHE-08 prescribe un contenido mínimo de aire ocluido del 4,5% para hormigones sometidos a la clase de exposición F, con heladas o presencia de sales fundentes. Gjørv (2009) afirma que los

ambientes generados por estas sales pueden ser mucho más agresivos que la exposición marina. La inclusión de aire se presenta como una buena estrategia en estos casos, aunque no es sencillo conseguirlo de forma efectiva, a pesar de emplear aditivos inclusores de aire. Las adiciones, según dicho autor, no serían recomendables en esta clase de exposición. En caso de utilizar cenizas volantes, éstas pueden ser reactivas con dicho aditivo, incrementando el problema; el empleo de escoria siderúrgica puede ocasionar resistencias a la helada inferiores al cemento ordinario. Gjorv indica que se han obtenido buenas propiedades de durabilidad en este ambiente, con hormigones sin inclusión de aire pero con relaciones a/c muy bajas, del orden de 0,25-0,35. La EHE-08 admite relaciones a/c de hasta 0,5 en la clase F.

Para hormigones sometidos a la clase E (erosión), además de fijar a/c máxima (0,55) y el mínimo contenido en cemento, la EHE-08 establece también una resistencia a compresión mínima de 30 N/mm² y empleo de áridos finos de cuarzo o de dureza equivalente. Se limita también el contenido máximo de cemento en función del tamaño máximo del árido, y se prescribe un curado más prolongado que en casos ordinarios.

Con objeto de evitar la degradación debida a reacciones álcali-árido, se incluyen en la EHE-08 varias prescripciones referidas a las características de las materias primas (áridos y cementos). Alternativamente a las anteriores, la instrucción contempla el empleo de adiciones o, como protección adicional, la impermeabilización superficial. Un álcali es un compuesto que en disolución acuosa se comporta como una base fuerte. Una reacción álcali-árido se produce por la interacción de áridos que contienen minerales silicatados, potencialmente reactivos, con los álcalis del cemento. Esto lleva a la formación de geles que se expanden en presencia de agua, produciendo fisuración y movimientos diferenciales y, como consecuencia de ello, una disminución importante de la durabilidad.

En otro orden de cosas, el artículo 71 de la EHE-08 establece también requisitos relativos a la puesta en obra y curado de hormigón. En particular, acerca del curado se indica que debe mantenerse la humedad del mismo durante el fraguado y primer endurecimiento, aunque sin hacer prescripciones detalladas. El curado es un proceso de gran importancia en la durabilidad del hormigón. Como señala D'Andréa (2010), uno de los factores concurrentes en la detención de la reacción de hidratación del cemento es la falta de agua libre, que produce mayor volumen de poros, mayor conectividad entre ellos y posible retracción del elemento. La cantidad de agua inicial en el hormigón viene determinada por la relación a/c. Esta cantidad disminuye con el tiempo debido al consumo en las reacciones de hidratación, a la adsorción superficial y a las pérdidas por intercambios con el ambiente exterior. La actividad química decae cuando la humedad relativa (HR) interior baja del 80%, y se detiene cuando se alcanza el 30% de HR. La zona más afectada por el secado prematuro es la más cercana a la superficie. López et al. (1991) subrayan que variaciones leves en las condiciones de curado pueden tener efectos posteriores de importancia en la corrosión de las armaduras, ya que se podría condicionar de esta forma el mecanismo que controla el proceso de corrosión del acero en estado activo. Al-Assadi et al. (2008) y Fernández (2010) indican que el curado afecta también de forma muy importante a otras propiedades interiores y superficiales, como son la resistencia del recubrimiento, la resistencia a la abrasión, la permeabilidad, la estabilidad de volumen o la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo. Se ha señalado, al referirse a hormigones con adiciones, que el curado se torna más crítico en lo relativo a la durabilidad, con respecto a los hormigones ordinarios. Fernández (2010) subraya la gran relevancia que tiene la consecución de un curado adecuado durante los primeros días, a la hora de conseguir mejoras en cuanto a permeabilidad. También indica que una prolongación del curado puede disminuir la profundidad de carbonatación. La eficiencia del curado

puede caracterizarse mediante varias técnicas, siendo la más práctica la basada en la medición de la resistividad eléctrica, que permitiría aplicar medidas correctoras en tiempo real.

La EHE-08 recoge la necesidad de caracterizar la permeabilidad del hormigón sometido a clases de exposición III, IV o específicas, mediante el ensayo de penetración de agua bajo presión.

2.4.6.- Recubrimientos

En la EHE-08 se define el recubrimiento de hormigón como la distancia entre la superficie exterior de la armadura, incluyendo cercos y estribos, y la superficie exterior de hormigón más cercana. A mayor recubrimiento, mayor será el tiempo que tardan los agentes agresivos externos en alcanzar y deteriorar la armadura. Por este motivo se trata de un parámetro decisivo en la durabilidad, y la Instrucción especifica espesores mínimos de recubrimiento según la clase de exposición, el tipo de cemento empleado, su resistencia, y la vida útil de proyecto (tablas 37.2.4.1 a, b y c de la EHE). Existen modelos matemáticos para la estimación de la vida útil del hormigón, en lo relativo al fallo por corrosión de la armadura, como los indicados en el Anejo 9 de la EHE-08 ("Consideraciones adicionales sobre durabilidad"), en el capítulo 6 de la referencia Gjørv (2009), o en el punto 1.4 de la referencia D'Andréa (2010). En dichos modelos el espesor de recubrimiento es una de las variables introducidas en el cálculo, siendo posible también determinar un recubrimiento mínimo necesario para alcanzar una vida útil determinada. En este sentido, y para hormigones expuestos a ambientes especialmente agresivos, Burón et al. (2011) proponen una modificación de las tablas de recubrimientos incluidas en la EHE-08, con mayores espesores según el caso. Estos autores señalan que el empleo de adiciones y de bajas relaciones a/c puede permitir menores recubrimientos.

2.4.7.- Control de la máxima apertura de fisura

La Tabla 5.1.1.2 de la EHE-08 limita los valores máximos de apertura de fisura en función de la clase de exposición ambiental, con valores que oscilan entre 0,1 y 0,4 mm. La presencia de grietas o fisuras en el hormigón puede incrementar la penetración de sustancias corrosivas (agua, aire, sales). Como indica Gjørv (2009), no es posible establecer una relación simple entre ancho de fisura y probabilidad de corrosión para una estructura dada, en un entorno determinado. Un estudio detallado de Wheat (2002), indica que la adición de fibras de polímeros al hormigón puede dar lugar a ligeras mejoras en la durabilidad, al limitarse la formación de microgrietas.

2.4.8.- Protecciones superficiales

El artículo 37.2.1 de la EHE-08 contempla, para entornos de especial agresividad en los que las medidas normales de protección no se consideren suficientes, el empleo de sistemas especiales de protección. Entre ellos se encuentran las protecciones superficiales, que se tratan en este epígrafe. Los restantes sistemas especiales están relacionados con la corrosión de las armaduras y se abordan más adelante en el apartado 2.6.

Los productos de protección superficial pretenden prevenir o retardar la penetración de agentes agresivos, haciendo el hormigón menos permeable a los cloruros, reduciendo el contenido de humedad o combinando ambos efectos. Estos tratamientos pueden cubrir de forma continua la

superficie exterior del hormigón, proteger de la entrada de agua la superficie interior de los poros o sellar los poros capilares. También existen protecciones basadas en la aplicación de una capa densa de un material cementante (Gjorv, 2009). La eficacia protectora de algunos tratamientos superficiales puede disminuir con el tiempo, debido a la acción de la climatología exterior, por lo que en muchos casos se requiere de una re-aplicación periódica para asegurar la protección a largo plazo. Wheat (2002) estudia el comportamiento de un revestimiento de resina epoxídica; estas resinas son un grupo de plásticos termoestables cuya característica común es incorporar el grupo epóxido en su estructura, y forman largas cadenas poliméricas con fuertes enlaces tridimensionales cuando reaccionan con un agente endurecedor. Por su parte, Almussallam (2003) analiza la efectividad de cinco tipos genéricos de revestimientos: acrílicos, emulsiones poliméricas, resina epoxídica, poliuretano y caucho clorado. Los resultados del estudio muestran que son los revestimientos epoxídicos los más adecuados en casos de ataques químicos y de humedad elevada, mientras que ante la penetración por cloruros es el revestimiento de poliuretano el que ofrece mejores resultados. Las emulsiones poliméricas son los revestimientos que resultan tener menor eficacia.

La protección superficial también puede estar orientada a resistir agresiones químicas específicas o de carácter mecánico, como en el caso de entornos erosivos o abrasivos. En estos casos se puede revestir el hormigón mediante caucho, asfalto, vidrio, acero, plomo o gres, entre otros materiales (véase García et al., 2010, capítulo 10 “Durabilidad de las estructuras de hormigón armado”).

2.4.9.- Protección frente a la corrosión de las armaduras

Como se ha venido comentando en los epígrafes anteriores, existen diferentes tipos de agresiones que pueden reducir la vida útil de una estructura de hormigón. Sin embargo la patología más habitual es la debida a la corrosión de las armaduras, y a ella se ha dedicado de forma más extensa literatura existente (Al-Rabiah et al., 1990; Polder, 1996; Alonso et al., 2007; Gjorv, 2009; D’Andréa, 2010; entre otras). El Anejo 9 de la EHE-08 presenta varios modelos de durabilidad para procesos de corrosión. Sintetizando la información aportada por las fuentes anteriores, a continuación se intenta resumir el proceso de corrosión de las armaduras.

El acero embebido en el hormigón se encuentra inicialmente pasivado ante la corrosión, debido a que el pH existente en la matriz cementante es altamente alcalino ($\text{pH} \geq 12-13$). En este entorno se forma una fina capa de óxido en la superficie del acero, que permanece estable y proporciona protección al mismo (pasivado).

Con el paso del tiempo, el CO_2 atmosférico se difunde en el interior del hormigón y da lugar al proceso conocido como “carbonatación”, por el cual el dihidróxido de calcio (Ca(OH)_2) existente en la pasta hidratada pasa a carbonato cálcico (CaCO_3), de forma que se revierte la reacción que tiene lugar en el horno de clinkerización, durante la fabricación del cemento. La carbonatación va acompañada de una disminución del pH, al disminuir la concentración de dihidróxido de calcio. La permeabilidad del hormigón y el espesor de recubrimiento son parámetros decisivos ante la carbonatación. En ambientes agresivos, agentes externos como los cloruros también se pueden introducir en el interior del hormigón, especialmente si existe un medio de transporte como es la humedad, creando una fase líquida. La pérdida de alcalinidad (disminución del pH por debajo de 9) en las proximidades del acero, la llegada de una cantidad importante de cloruros a la superficie de la armadura, por encima de una concentración límite o umbral, junto con la disponibilidad de oxígeno (habitual en estructuras no sumergidas), desencadenan la rotura de la capa protectora de óxido

(despasivación) y comienza el proceso de corrosión electroquímica del acero. Tanto el ánodo (donde el Fe se disuelve) como el cátodo (en el que reacciona el oxígeno) se encuentran en la superficie del acero. Durante la corrosión se originan escamas de óxido o herrumbre, que son productos de naturaleza expansiva. El resultado final es, por una parte, la pérdida de sección resistente de acero, que puede llegar a comprometer la capacidad mecánica del elemento o incluso arruinar por completo la estructura. Por otro lado, el hormigón se fisura debido a la expansión del acero. Esto favorece aún más el proceso de corrosión. Si no se interviene, el resultado final es que el recubrimiento se desprende, quedando las armaduras expuestas al exterior. A partir de ahí la corrosión podrá transcurrir con la máxima rapidez, y terminará por eliminar partes enteras de la armadura, si esto no hubiera ocurrido con anterioridad. La corrosión es posible en condiciones medias de humedad y cuando existen ciclos humedad-sequedad, no ocurriendo en hormigones completamente secos, al no existir fase líquida que actúe como electrolito, ni en hormigones permanentemente sumergidos, al no llegar oxígeno a la armadura.

Existen diferentes hipótesis o modelos para representar la corrosión y determinar su avance. En general, se contempla que existe una fase inicial, denominada “fase de inicio de la corrosión”, durante la cual se producen la carbonatación del recubrimiento de hormigón y la penetración de cloruros en su seno, sin que comience la corrosión efectiva de la armadura; es el tiempo necesario para que se produzca la despasivación de la armadura. Luego hay una segunda fase, denominada “de propagación” durante la cual se pierde la condición de protección y la armadura comienza a corroerse. Durante este periodo se producen pérdidas de sección y ductilidad de las armaduras, fisuración del hormigón y pérdida de adherencia entre armadura y hormigón. En función de la velocidad con que avance la reacción electroquímica (tasa de corrosión) la vida útil residual de la estructura será mayor o menor; ésta llegará a su fin cuando la corrosión de las armaduras haya provocado la disminución de la reserva de seguridad por debajo de límites aceptables. Este modelo es conocido como “Modelo de corrosión de Tutti” y en él se basa el adoptado en el Anejo 9 de la EHE-08.

Para luchar contra los efectos de la corrosión existen diferentes técnicas o sistemas, al margen de los indicados en apartados anteriores, relacionados con la mejora de la permeabilidad y de la protección ofrecida por el recubrimiento. La EHE-08 contempla la protección de armaduras mediante revestimientos, el empleo de armaduras de acero inoxidable, los aditivos inhibidores de la corrosión o la protección catódica.

Las armaduras ordinarias de acero al carbono pueden protegerse mediante **recubrimiento electroquímico (galvanización)** o mediante resina epoxi (El-Hawary y Abdul-Jallel, 2010; Vaquero, 2010). El **recubrimiento con resina epoxi** es una técnica por ahora poco empleada en España, pero que se aplica desde hace décadas en EEUU y Canadá, especialmente en construcción de grandes infraestructuras. Su finalidad es establecer una barrera física que impida que los cloruros alcancen la superficie del acero y den lugar a la corrosión. Vaquero (2010) hace referencia a estudios que muestran cómo el empleo de este tipo de revestimiento en la capa superior de armado de losas de puentes puede reducir la susceptibilidad a la corrosión en al menos un 50% con respecto a las armaduras convencionales, mientras que si el revestimiento alcanza a la totalidad de las armaduras, la protección se acerca a la proporcionada por el empleo de aceros inoxidables. Ensayos realizados con aceros de utilización habitual en España han mostrado que el recubrimiento no altera las características del acero y permite las operaciones habituales de corte y doblado, alterando de forma leve las condiciones de adherencia entre la barra y el hormigón. Un posible problema de este sistema es que puedan aparecer corrosiones localizadas, incluso más peligrosas que la corrosión

generalizada, en los puntos en los que el revestimiento haya sido dañado durante las operaciones de transporte y colocación, no habiendo sido reparado (El-Hawary y Abdul-Jallel, 2010).

El empleo de **armaduras de acero inoxidable** es una solución adecuada desde el punto de vista de la durabilidad, dado su muy elevado nivel de protección frente a los ataques por cloruros. Su elevado coste hace que este método sea inviable para estructuras ordinarias, aunque sí se utiliza en determinados casos. El lector puede encontrar más información al respecto en el capítulo 7 de Gjørv (2009). Una técnica eficiente es emplear armaduras inoxidables únicamente en las zonas más exteriores, críticas o vulnerables de la estructura, ya que se ha comprobado que el contacto eléctrico entre armaduras inoxidables y armaduras de acero al carbono no incrementa el riesgo de corrosión de éstas últimas (Medina et al., 2011). La resistencia de los aceros inoxidables ante los cloruros es muy superior a la de los aceros al carbono, y de igual modo su coste inicial también es varias veces superior. Sin embargo, la ausencia de mantenimiento, junto con la notable extensión de la vida útil que presentan, pueden arrojar ventajas en coste cuando se evalúa el ciclo de vida completo, ya que pueden resistir adecuadamente concentraciones de cloruros difíciles de alcanzar incluso en entornos agresivos. Gjørv (2009) indica que la sustitución de un 40% del acero al carbono por inoxidable en una estructura portuaria no incrementaría los costes totales en más de un 5%. Nuevos aceros inoxidables de bajo contenido en níquel son una alternativa más económica a los tradicionales, manteniendo un nivel de protección equivalente (Medina et al., 2011).

Por su parte, de acuerdo con Söylev y Richardson (2008), los **inhibidores de corrosión** son sustancias químicas cuya presencia en un entorno de corrosión, en una concentración adecuada, disminuye la tasa de corrosión, haciéndolo sin cambios significativos en la concentración de cualquier otro agente de corrosión. Los inhibidores pueden emplearse en estructuras de nueva factura, y también en la rehabilitación de estructuras dañadas. Son productos de bajo coste y aplicación sencilla. Pueden añadirse al hormigón fresco, aplicarse sobre la superficie ya endurecida, incorporarse a morteros de reparación, o emplearse como tratamiento superficial de las armaduras, antes del hormigonado. Sus mecanismos de actuación pueden ir dirigidos a actuar sobre el ánodo, sobre la reacción anódica o sobre ambos. Así, por ejemplo, el nitrito de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) actúa sobre el ánodo; el hidróxido de sodio (NaOH) y el carbonato de sodio (Na_2CO_3) lo hacen sobre la reacción anódica; y los aminoalcoholes, muy empleados en la actualidad, actúan sobre ambos, formando una capa protectora sobre el acero que lo aísla de agentes agresivos. Algunos inhibidores también presentan la propiedad secundaria de bloquear los poros del hormigón, lo cual va más allá de la definición de Söylev y Richardson (2008), ya que esto modifica las concentraciones de agua, cloruros y oxígeno en el interior. El objetivo principal de los inhibidores de corrosión es la protección del acero, sin embargo también pueden afectar a las propiedades del hormigón; en particular, a la resistencia a la penetración de agua y de cloruros, y a la carbonatación, como señalan Zheng et al. (2012). Estos autores analizan los efectos sobre el hormigón de un inhibidor basado en un aminoalcohol, extrayendo como conclusión que su efecto es positivo sobre la estructura porosa, de forma que el bloqueo de los poros disminuye la penetración de agentes externos y la profundidad de carbonatación, siendo más notable la mejoría es cuanto menor es la relación a/c. Para terminar esta reseña sobre inhibidores, hay que decir que sus efectos son susceptibles de disminuir con el paso del tiempo, debido a su consumo y al incremento de la concentración de cloruros (Gjørv, 2009).

Por último, la **protección catódica** aparece indicada en la literatura existente como el mejor método para mantener bajo control la corrosión inducida por cloruros (por ejemplo, Gjørv, 2009). Este sistema se basa en que el valor umbral de cloruros para el inicio de la corrosión se incrementa a medida que disminuye el potencial electroquímico del acero. Haciendo circular a través de la armadura

densidades de corriente muy bajas, del orden de 2 mA/m^2 , se puede llevar el potencial a valores que supriman el inicio de la corrosión, incluso con elevadas concentraciones de cloruros en la superficie del acero. Este sistema tiene costes no despreciables de instalación y mantenimiento. Es aplicable tanto a estructuras nuevas como a otras ya construidas y que comienzan a mostrar signos de deterioro. En ambos casos, para su funcionamiento es imprescindible que exista continuidad eléctrica entre las armaduras.

Un aspecto no mencionado en la EHE-08 es el empleo de **armaduras no metálicas**, como por ejemplo los materiales poliméricos reforzados con fibras (*Fiber-Reinforced Polymers*: FRP).

La Instrucción española tampoco contempla la **sustitución de parte del contenido en cemento por polímeros**, aspecto tratado por El-Hawary y Abdul-Jallel (2010), que permite mejorar el comportamiento frente a la corrosión sin necesidad de tratar las armaduras. El reemplazo de un 20% o más del cemento por epoxi introduce significativas mejoras en cuanto a resistencia a la corrosión, permeabilidad y penetración de cloruros, así como un ligero incremento de la resistencia a compresión. Las propiedades mejoran de forma proporcional al aumento del porcentaje de sustitución, siendo dicha mejora independiente de la relación a/c.

La EHE-08 tampoco hace referencia a la **medición o monitorización de las variables relacionadas con la durabilidad**, durante la vida útil de la estructura. Osborne (1999) indica que la monitorización de parámetros de durabilidad ayuda a alcanzar la misma, pues permite la toma de acciones correctoras de forma temprana. García et al. (2010; capítulo 10) hacen mención a la "Ley de Sitter", según la cual, de modo aproximado o estimativo, una unidad monetaria gastada en proyectar y construir adecuadamente una estructura sería tan eficaz como cinco unidades invertidas en actuar durante la fase de pre-corrosión (carbonatación y penetración de cloruros), como veinticinco unidades empleadas en reparaciones durante la corrosión local activa, y como ciento veinticinco unidades dedicadas a reparaciones de gran envergadura durante la fase de corrosión generalizada, que puede llevar al final de la vida útil.

D'Andréa (2010) se ha dedicado al desarrollo de **indicadores de corrosión** que permitan predecir la durabilidad del hormigón. Los indicadores de corrosión son propiedades medibles a través de ensayos que pueden reflejar características en cuanto a microestructura, mecanismos de transporte de agentes agresivos, y deterioros debidos a la corrosión. Para realizar la comprobación del Estado Límite de Durabilidad indicada en el Anejo 9 de la EHE-08, el subcomité español del hormigón CTN83/SC10 ha aprobado la propuesta PNE 83944 de diseño de hormigones. En ella se establecen cuatro niveles para la predicción de la durabilidad, en los cuales el tiempo puede ser una variable implícita (niveles 1 y 2) o explícita (niveles 3 y 4). El nivel 1 consiste en la comprobación de la durabilidad mediante el cumplimiento de determinadas especificaciones, lo cual coincide con el enfoque tradicional empleado en normas y códigos. En el nivel 2 la durabilidad se comprobaría mediante especificaciones sobre indicadores, implicando la realización de ensayos o mediciones. Los niveles 3 y 4 tienen carácter predictivo, e incluirían la determinación del tiempo de vida útil de la estructura en base a modelos matemáticos semi-probabilísticos o probabilísticos, respectivamente. Estos modelos pueden utilizar como variables los resultados de indicadores de corrosión.

El indicador señalado por D'Andréa (2010) como el más adecuado a la hora de estudiar la durabilidad de un hormigón es su resistividad eléctrica. La resistividad es una medida volumétrica de la resistencia eléctrica, inversa de la conductividad, que refleja la capacidad del hormigón para transportar carga eléctrica. Las propiedades eléctricas del hormigón están directamente relacionadas

con sus características microestructurales (porosidad, tortuosidad de los poros) y con el contenido de humedad. La resistividad puede medirse de forma continua y a bajo coste en estructuras en servicio. A partir de ella se pueden obtener coeficientes de difusión de los agentes agresivos. Puede aplicarse para determinar la tasa de corrosión, ya que refleja la disponibilidad de oxígeno a nivel de armadura. Resistividades elevadas implican velocidades de corrosión bajas. Fernández (2010) plantea su empleo como indicador de la eficacia del curado, dada su estrecha dependencia con el contenido en humedad del hormigón.

2.5 ASPECTOS SOCIALES DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

2.5.1.- Introducción

El tercer pilar de la sostenibilidad, según las definiciones empleadas en el Capítulo 1 de esta Tesis (UN, 1987; UN, 1992; Jefatura del Estado, 2011), que es lo que se podría considerar como su “vertiente humana”, es posiblemente el más difícil de acotar y definir. Mientras que los aspectos ambientales y económicos están ampliamente estudiados por diversas disciplinas, la parte social genera una mayor confusión a la hora de ser plasmada en un modelo de evaluación como el que se pretende aportar en esta Tesis.

Se trata del pilar menos trabajado en la literatura existente, por lo menos en la ingeniería de la construcción. Vifell y Soneryd (2012) indican que la medida de los impactos sociales y la formulación de indicadores adecuados está menos desarrollada que en el caso de los impactos ambientales. Para Labuschagne y Brent (2006), la inclusión de aspectos sociales en el estudio de la sostenibilidad ha venido siendo marginal frente a los ambientales o económicos, aunque la tendencia actual es de progresiva incorporación de estos aspectos.

Existen múltiples referencias (McKenzie, 2004; Dreyer et al., 2006; Assefa et al., 2007; Jorgensen et al., 2008; Dempsey et al., 2009; Henry y Kato, 2011; por ejemplo) que particularizan o profundizan en el impacto social de determinados proyectos o determinadas políticas, aunque el número de publicaciones relativas a la sostenibilidad de las estructuras de hormigón es mucho menor. En los epígrafes siguientes de este capítulo se reseñarán conceptos generales de la sostenibilidad social, necesarios como base de estudio para definir indicadores concretos acordes al objeto de la presente Tesis. Más adelante, en el Capítulo 8, se presentarán y discutirán los aspectos sociales a tratar en la evaluación de la sostenibilidad de las estructuras de hormigón.

2.5.2.- Los objetivos de sostenibilidad de las Naciones Unidas

La Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó en 2015 su programa y objetivos de desarrollo para los próximos años, detallados en el documento “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” (UN, 2015). Este programa es continuador de anteriores agendas (UN, 1992; UN, 1998) y se organiza en torno a 17 objetivos y 169 metas, configurando un plan de acción “*en favor de las personas, el planeta y la prosperidad*” para los próximos años. Esta alusión a los tres pilares de la sostenibilidad, extraída del preámbulo del documento citado, indica ya que la atención principal se coloca esta vez en la parte social (las personas), tras haber abordado ampliamente con anterioridad los aspectos ambientales y económicos.

Las líneas generales expresadas por el documento incluyen el compromiso con la lucha contra la pobreza y el hambre, la reducción de las desigualdades dentro de los países y entre países, la paz, la justicia y la inclusión social, la protección de los derechos humanos y la igualdad de ambos sexos. Se vincula además el crecimiento económico sostenible a la promoción del trabajo “decente” o digno, entre otros factores. Nótese que, con cierta frecuencia, en la literatura existente en idioma español se emplea el término “condiciones de trabajo decente”; se trata de una expresión resultante de la

traducción directa del término inglés *decent employment* (o *decent job*). Sin embargo, resulta más adecuado usar el término “trabajo o empleo digno”, que será el que usaremos aquí, normalmente.

Los objetivos 1 y 2 se centran respectivamente en la lucha contra la pobreza y el hambre. Actualmente se considera pobreza extrema el contar con ingresos diarios menores a una determinada cantidad, que puede ser diferente según el país o región de que se trate. Se pretende que sea erradicada por completo en 2030, al igual que el hambre y la malnutrición.

El objetivo 4 pretende garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad para todos los habitantes del planeta, planteando la importancia de la formación en el desarrollo de las sociedades y la generalización de formas de trabajo justas y dignas. La igualdad de ambos sexos y la eliminación de las discriminaciones sobre la población femenina son tratados en el objetivo 5.

En materia de empleo, abordado en el objetivo 8, se plantea la necesidad de evolucionar hacia la consecución de una situación de pleno empleo en 2030, con la generalización del principio de igual remuneración por igual trabajo y la erradicación del trabajo forzado y del trabajo infantil. El objetivo 9 incluye la promoción de la investigación y desarrollo y la transferencia tecnológica a las empresas.

La reducción de la desigualdad y la potenciación de la inclusión social, económica y política de todas las personas forman parte del objetivo 10. La protección del patrimonio cultural y natural es uno de los aspectos contemplados en el objetivo 11. El objetivo 16 contempla aspectos relacionados con la violencia, maltrato, actividades ilícitas y corrupción, entre otros aspectos.

2.5.3.- Indicadores de sostenibilidad social

Tradicionalmente la parte social ha sido el pilar más “débil” de la sostenibilidad, debido a la escasez de herramientas o desarrollos analíticos que permitiesen facilitar su estudio (Labuschagne y Brent, 2006). En este sentido, han ido apareciendo múltiples iniciativas para establecer marcos de análisis e indicadores de sostenibilidad social. En este epígrafe se reseñarán algunas de estas propuestas, con el propósito de plantear conceptos que podrán ser utilizados en capítulos posteriores.

Labuschagne y Brent (2006) realizan un análisis de múltiples publicaciones relativas a la evaluación de impactos sociales, tanto procedentes de organismos estatales o internacionales como de trabajos de investigación, relativos a la evaluación de la sostenibilidad en la industria de proceso. Este enfoque resulta más adecuado a los objetivos de la presente Tesis que el de otros trabajos, centrados en puntos de vista de mayor alcance como es el caso, entre otros, del análisis global de la sostenibilidad social de un sistema económico o político.

En primer lugar, dichos autores clasifican en tres grandes grupos los aspectos sociales analizados en las diferentes propuestas: aspectos relativos a la sociedad, aspectos de la interrelación sociedad-empresa, y aspectos internos de la empresa. Se encuadran como relativos a la sociedad la salud, la educación, el entorno, la vivienda, la seguridad y la delincuencia, las instalaciones y servicios, las características de la población y de la comunidad, el bienestar económico y el empleo, y la cohesión comunitaria. La relación sociedad-empresa incluye la responsabilidad del producto, la implicación de la empresa en la comunidad y la participación de los accionistas. Finalmente, se señalan como aspectos internos de la empresa la formación de la plantilla, la equidad, las buenas prácticas laborales, el respeto a los derechos humanos y la seguridad y salud de los trabajadores.

Seguidamente, Labuschagne y Brent (2006) definen una serie de aspectos sociales, repartidos en cuatro categorías, que posteriormente utilizan en el desarrollo de un indicador de sostenibilidad social. Se resumen a continuación la clasificación y definición de estos aspectos, en tanto que resultan de interés para los desarrollos que se incluirán en los capítulos 8 y 10 de esta Tesis.

La categoría “**recursos humanos internos**” se ocupa de la responsabilidad social de la empresa hacia sus trabajadores e incluye aspectos del empleo, como son:

- La **estabilidad laboral**, relacionada con la influencia de las decisiones empresariales en la generación de empleo por parte de la empresa, la estabilidad del mismo, y la adecuación de las remuneraciones.
- Las **prácticas laborales**, que tienen que ver con la verificación de que los comportamientos de la empresa para con sus empleados son respetuosos con los derechos humanos, la legislación nacional vigente y las buenas prácticas laborales.
- La **seguridad y salud**, que es un aspecto bastante bien conocido, centrado en la prevención de riesgos laborales y en la gestión de la salud de los trabajadores y de los accidentes e incidentes.
- **Capacidad y desarrollo**, que engloba la investigación, el desarrollo y la innovación, por un lado, y la evolución de la carrera profesional, por otro.

La categoría “**población externa**” estudia los impactos de las actividades de la empresa sobre la sociedad, como son la disponibilidad de servicios, la cohesión comunitaria o el bienestar económico. Incluye aspectos relacionados con:

- El **capital humano**, referido a la capacidad del individuo para el trabajo productivo, acompañado de aspectos como la salud física y mental, y la capacitación y formación en competencias profesionales.
- El **capital productivo**, que mide el impacto de la actividad de la empresa sobre la disponibilidad de bienes e infraestructuras necesarias para el desarrollo de la producción.
- El **capital comunitario**, que tiene en cuenta el impacto de las actividades empresariales en las relaciones sociales e institucionales.

La tercera categoría, denominada “**desempeño macrosocial**”, valora la contribución de una organización al desarrollo ambiental o financiero de una región o país. Trata sobre aspectos relativos:

- Al **desempeño socioeconómico**, que valora el impacto económico externo de las actividades de la empresa, con su contribución al bienestar económico y la generación de oportunidades de negocio.
- Y al **desempeño socioambiental**, que contempla la contribución de las iniciativas empresariales a la mejora del entorno para la sociedad, en los ámbitos local, regional y nacional.

Por último, en la categoría de “**participación de los accionistas**” se analiza la relación de la empresa con su accionariado al completo, en función de la información compartida y de la influencia de los accionistas en la toma de decisiones. Se incluyen aspectos relacionados con:

- La **provisión de información**, que mide la cantidad y calidad de información sobre la empresa que se comparte con los accionistas.
- Y con la **influencia de los accionistas**, valorando el grado en que la empresa escucha las opiniones del accionariado.

Adicionalmente, Jorgensen et al. (2008) realizan una revisión de diversas propuestas de metodologías de análisis de ciclo de vida para impactos sociales; se trata de desarrollos con una sistemática análoga a los ACV ambientales y económicos ya mencionados con anterioridad. En cada uno de los análisis sociales estudiados se utilizan determinados indicadores, que los autores agrupan en diferentes categorías. Se recogen a continuación, dado que muestran aspectos complementarios a los indicados anteriormente.

Dentro de la categoría “**derechos humanos**” se valoran la no discriminación de empleados, por motivos de diversidad, sexo, edad, o modalidad de trabajo, entre otros aspectos; la libertad de asociación y de negociación colectiva; y la existencia de trabajo infantil y trabajo forzado.

En la evaluación de las **prácticas laborales y condiciones de trabajo** se incluyen aspectos relacionados con:

- El **salario**, como la equidad de la remuneración entre diferentes grupos, la regularidad en los pagos, el salario mínimo, la jornada laboral y la estacionalidad en el empleo.
- Los **beneficios sociales** ofrecidos a los empleados y sus familias.
- Las **condiciones físicas del trabajo**, que contemplan los índices de accidentabilidad y enfermedades profesionales, la pesadez de las tareas, las instalaciones de bienestar y la distancia a la zona de trabajo.
- Los **factores psicológicos y organizativos**, como la duración máxima de la jornada, las prácticas de acoso, los canales de comunicación, lo relativo al comité de seguridad y salud, la satisfacción con el trabajo, y las condiciones contractuales.
- Y la **educación y formación de los trabajadores**.

En la categoría “**sociedad**” se engloban aspectos como:

- La existencia de **prácticas de corrupción**: fraude, sobornos, fijación ilegal de precios, violación del derecho a la propiedad.
- El **apoyo al desarrollo y las acciones positivas para la sociedad**, como la creación de empleo, el apoyo a los suministradores locales y a los países en desarrollo, las inversiones en I+D+i e infraestructuras, y el desarrollo de programas educativos locales.

- La **aceptación de la empresa por parte de la comunidad local** y la existencia de canales de comunicación con la misma.

- Y la **aplicación de criterios de sostenibilidad en las relaciones entre empresas**.

Finalmente, el concepto de “**responsabilidad del producto**” incluye la integración en el producto final de aspectos relativos a la seguridad y salud de los usuarios finales, en lo referente a condiciones de uso y manipulación; el nivel de información sobre producto que se aporta a los usuarios o clientes finales; y la política de comunicación comercial y de publicidad.

2.5.4.- La desigualdad

En términos generales, bajo muchos de los aspectos o impactos sociales referidos en el epígrafe anterior subyace la desigualdad como aspecto común, transversal o colateral. Una sociedad en la que existan grandes desigualdades entre sus individuos, y éstas persistan o se agraven en el tiempo, difícilmente podrá resultar un entorno sostenible para el desarrollo.

Ortiz y Matthew (2012) realizan un análisis de la desigualdad de ingresos en 141 países del mundo. La desigualdad económica es sólo una de las facetas o vertientes de la desigualdad, pero suele ir aparejada a las otras, o ser una de las principales causas de ellas. Según el estudio, en términos de tipos de cambio de mercado, en 2007 el 20% más rico de la humanidad disfrutaba de más del 80% de los ingresos globales, mientras que al 20% más pobre le correspondía el 1% de los ingresos. Realizando el análisis en términos de paridad de poder adquisitivo, los resultados son ligeramente más suaves, aunque similares: el 70% de los ingresos corresponde al 20% más rico, y poco más del 2% al 20% más pobre. El incremento de ingresos entre 1990 y 2007 del 40% de la población más pobre fue exiguu, del orden del 1%.

En perspectiva histórica, la desigualdad fue en aumento desde principios del siglo XIX, acrecentándose esa tendencia a partir de 1980. El efecto de la crisis económica actual puede estar afectando en el sentido de acelerar el incremento de la desigualdad. En el informe referido se reseña que la desigualdad afecta en especial grado a la población más joven, debido a la mayor tasa de natalidad de los grupos más desfavorecidos. A su vez, no parece que alcance en diferente medida a hombres y mujeres. Entre regiones, los niveles más extremos de desigualdad se dan en países con nivel de ingresos medio. Por otra parte, tanto en países de ingresos bajos como de ingresos altos el poder adquisitivo de las clases medias y bajas se encuentra en progresiva disminución frente a las clases altas.

La variación de la desigualdad no está estrictamente vinculada al crecimiento económico, ya que se han observado incrementos de las diferencias en países con tasas de crecimiento positivas prolongadas durante largos periodos, como Estados Unidos, China o la India, pero también reducción de las mismas en otros casos de similar crecimiento como Brasil. Para Ortiz y Matthew (2012), esta circunstancia muestra el gran papel que puede jugar la voluntad política, institucional y empresarial a la hora de corregir la desigualdad.

Entre los **principales problemas generados por la desigualdad económica**, estos autores destacan los siguientes:

- **Ralentización del crecimiento económico.** Se observa que los países con mayor desigualdad crecen a un ritmo más lento, especialmente dentro del grupo de los países en desarrollo.
- **Incremento de los problemas sociales y de salud.** Se ha comprobado que existe una fuerte correlación entre la desigualdad de ingresos y la incidencia de enfermedades físicas y mentales, criminalidad y violencia, adicciones, nivel educativo, o movilidad social, entre otros aspectos.
- **Inestabilidad política.** Las sociedades más desiguales resultan más propensas a la generación de conflictos y a su resolución por medios violentos o inconstitucionales.
- **Generación de desigualdades sociales más graves,** especialmente en la infancia, con mayores problemas de salud y educación.

El estudio histórico de la concentración de la riqueza y su proyección a futuro es uno de los temas tratados en el conocido ensayo “El Capital en el Siglo XXI”, de Thomas Piketty (2014), un estudio de gran importancia en el cual el autor concluye la existencia de una “espiral desigualitaria” que podría poner en jaque a la sociedad democrática.

2.5.5.- La responsabilidad social corporativa

La responsabilidad social corporativa (RSC), o responsabilidad social empresarial, supone la integración voluntaria, por parte de las empresas, de las preocupaciones sociales y medioambientales en sus operaciones comerciales y en las relaciones con sus interlocutores (Comisión Europea, 2001). Este concepto de responsabilidad social implica la adopción de medidas y compromisos adicionales a los legalmente exigidos, especialmente en materia de derechos sociales e impactos medioambientales, sin que en ningún momento suponga la sustitución de normas y disposiciones legales en vigor.

Aunque inicialmente la puesta en marcha de programas de RSC ha correspondido a empresas de gran tamaño, resulta fundamental también su extensión a las pequeñas y medianas empresas, dada su abundancia y su importante contribución a la economía.

Según la Comisión Europea (2001), cabe diferenciar entre las dimensiones interna y externa de la responsabilidad social. A nivel interno, la responsabilidad social abarca las relaciones de la empresa con sus propios trabajadores, en aspectos de formación, seguridad y salud, o gestión del cambio, así como la gestión de los recursos empleados en la producción. A nivel externo se extiende a las relaciones e interacciones de la empresa con las comunidades locales en que se asienta, socios comerciales, proveedores, consumidores finales, instituciones y organizaciones no gubernamentales.

La Comisión Europea (2013) ha identificado determinadas prácticas que se consideran clave para el impulso de la responsabilidad social en las empresas:

- **Mejora del gobierno corporativo y de su transparencia,** tanto en la elección y remuneración de directivos como en las relaciones con los accionistas y su papel en la empresa.

- ***Inversión socialmente responsable***, orientando la misma hacia empresas con un buen desempeño en RSC.
- ***Compras públicas y privadas socialmente responsables***, de modo que al introducir criterios de sostenibilidad en la cadena de valor empresarial se transmiten los principios de la responsabilidad social hacia los escalones más bajos (pymes y autónomos), que en muchos casos quedan alejados de este tipo de prácticas.
- ***Generación de crecimiento sostenido y competitividad en torno a las tecnologías limpias***, que lleven a la ecoeficiencia energética y la lucha contra el cambio climático.
- ***Creación de hábitos de consumo responsable***, tanto por parte de las administraciones como de las empresas, para transmitir la RSC a los clientes finales.
- ***Innovación responsable***, incluyendo criterios éticos y de responsabilidad en el desarrollo científico y tecnológico.

En España el RD 221/2008 (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2008) crea el Consejo Estatal de Responsabilidad Social de las Empresas (CERSE), encargado de fomentar e impulsar políticas de RSC. Posteriormente, la Ley de Economía Sostenible (Jefatura del Estado, 2011) contempla la promoción de la responsabilidad social corporativa y obligaciones en este sentido para el sector público empresarial.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.

3.1 INTRODUCCIÓN

El objeto del presente capítulo es resumir el desarrollo de la Tesis y la metodología seguida para su elaboración. Se aborda aquí el planteamiento de las directrices generales, y en capítulos posteriores se describen los métodos específicos empleados para cada desarrollo parcial.

Para alcanzar los objetivos de la Tesis, descritos en el Capítulo 1, se han realizado los siguientes pasos:

- Revisión detallada de literatura existente sobre los temas a tratar, con el objetivo de obtener un nivel de conocimiento suficiente que permitiese los desarrollos que se han afrontado en la Tesis. Se han consultado más de trescientas referencias, muchas de las cuales se consignan en el Anejo 1 de este trabajo, y se citan en diversas partes del mismo, empezando por el capítulo anterior (Capítulo 2), dedicado al estado del arte.
- Realización de una serie de trabajos de base relativos al impacto ambiental, económico y social de las estructuras de hormigón, empleando métodos y herramientas propios de análisis de ciclo de vida (ACV). Se han utilizado registros estadísticos proporcionados por la industria, datos de la literatura existente, incluyendo documentación técnica, se han realizado visitas a plantas industriales y se han mantenido entrevistas con profesionales de los sectores implicados. Se han realizado cinco publicaciones sobre estos trabajos, cuatro en un congreso (Mel et al., 2014a, b, c, d) y una en una revista indexada JCR (Mel et al., 2013).
- Análisis crítico del modelo del Anejo 13 de la EHE-08, a la vista de los resultados obtenidos de los trabajos de base anteriores, aclarando hasta qué punto dicho modelo es coherente con un análisis de tipo ACV, y estableciendo las líneas principales para la revisión del modelo. Sobre este análisis se ha realizado una publicación en congreso (Mel et al., 2015a) y otra en una revista JCR (Mel et al., 2015b).
- Elaboración de un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad, basado en el análisis crítico del Anejo 13 y en los trabajos de base realizados, de tipo ACV, y aplicación del mismo a un caso práctico. En el momento de entregar esta Tesis se están preparando dos publicaciones al respecto. Como se ha anticipado, el modelo no se ha concebido necesariamente para su inclusión en un entorno normativo, sino como un modelo de uso general.

3.2 REVISIÓN BILIOGRÁFICA

Como se ha anticipado, la primera fase de la Tesis ha supuesto la búsqueda, consulta y revisión de más de trescientas referencias: publicaciones científicas (tesis doctorales, artículos de revista, libros, comunicaciones en congresos), publicaciones técnicas especializadas (artículos de revista, libros), legislación y normativa, y otros documentos físicos y electrónicos generados por fabricantes, asociaciones profesionales y centros formativos y de investigación, entre otros tipos de referencia. La principal dificultad de esta fase ha sido su amplitud, dada la abundancia de aspectos que debe abordar un análisis de sostenibilidad ambiental, social y económico.

Esta labor de revisión comenzó al principio del trabajo doctoral, y ha durado buena parte del mismo. Abarca múltiples temáticas, tal y como es característico en un campo multidisciplinar como el que se trata. Al estudio de la propia sostenibilidad se unen el de la naturaleza del hormigón y de los procesos a él asociados: fabricación de cemento y acero, funcionamiento de canteras y plantas de hormigón, estructura del sector de la construcción, y organización del transporte de mercancías, entre otros aspectos. Resultaba necesario este conocimiento para poder analizar el ciclo de vida del hormigón. También había que estudiar las características e impactos ambientales derivados del empleo del hormigón estructural, incluyendo las herramientas empleadas para su evaluación, como el análisis de ciclo de vida. De la misma forma, había que estudiar los aspectos económicos y las implicaciones sociales de este tipo de estructuras. Como ya se ha introducido en el capítulo anterior (Capítulo 2), se ha dado mucha importancia a la durabilidad. Recuérdese que una durabilidad adecuada supone disminución de impactos económicos y al medio ambiente, salvo en caso de problemas de obsolescencia temprana, aspecto que también se ha tenido en cuenta.

Dicho Capítulo 2 contiene una breve selección de los principales aspectos encontrados en la literatura existente, con el objeto de servir de introducción y contextualización para la lectura de los capítulos posteriores. El resto de referencias empleadas se van citando en los momentos oportunos, en el resto de este documento. Finalmente, en el Anejo 1 se incluyen toda la bibliografía citada a lo largo de la Tesis.

Las búsquedas bibliográficas han sido realizadas a través del catálogo de la biblioteca de la UDC, empleando las bases de datos SCOPUS y Web of Science (WOS), el buscador Google Académico (*Google Scholar*) y los buscadores genéricos de Internet.

3.3 ESTUDIO DE ASPECTOS AMBIENTALES

El cumplimiento de los objetivos de la Tesis exigía conocer los efectos adversos de la producción y uso del hormigón sobre el medio ambiente, así como el origen de los mismos y una estimación de su magnitud. La literatura existente ofrece numerosos resultados en este sentido. No obstante, en el momento de iniciar los trabajos se observó que la mayoría de los datos disponibles correspondían a estudios realizados fuera de nuestras fronteras, existiendo dudas razonables acerca de si era oportuno asumirlos directamente, o no.

Como principal herramienta para obtener información de primera mano en este sentido, se ha empleado el análisis de ciclo de vida (AENOR, 2006). Se ha descompuesto el sistema objeto de estudio (hormigón estructural) en los subsistemas formados por sus componentes: cemento, acero, áridos y aditivos. Además, se han analizado los procesos necesarios para la construcción de la estructura: preparación del hormigón, elaboración de armaduras, transporte de los diferentes materiales, ejecución de obra. Cada uno de estos subsistemas ha sido estudiado por separado, integrando finalmente los resultados para obtener ratios de conjunto.

El Capítulo 4 se ha destinado al análisis de la producción de cemento. Se ha empleado una recopilación de datos de producción de las 35 plantas cementeras integrales españolas entre 2006 y 2010, ofrecida por OFICEMEN, 2012. En el mencionado capítulo se detalla la metodología empleada para el tratamiento de la información y la obtención de resultados.

El Capítulo 5 se ha dedicado a la producción de acero, aspecto sobre el que no se ha podido realizar un ACV particularizado para los productos nacionales, dado que no existe la misma disponibilidad de información sobre el sector español que en el caso del cemento. En consecuencia, se han recopilado datos procedentes de la literatura existente, contrastándose con las opiniones de varios profesionales del sector, que han sido entrevistados.

La producción de áridos en canteras es objeto del Capítulo 6. Se cuenta, al igual que en el Capítulo 4, con datos reales de producción de una decena de canteras graníticas, situadas en el norte de España. Se han realizado visitas a instalaciones, y entrevistas a expertos del sector. La información ha sido proporcionada por el grupo empresarial propietario de las plantas, y en el Capítulo 4 se detallan los procedimientos empleados para el tratamiento y manejo de los datos. Los resultados obtenidos aquí para los áridos graníticos son coherentes con las principales referencias al respecto, referidas a estos y otros áridos diferentes. Por tanto, se consideran generalizables dichos resultados. Por otro lado, sí que hay diferencias entre canteras y graveras, dada la diferente naturaleza de la explotación, con la ausencia de voladuras y machaqueo. No obstante, los resultados generados en esta Tesis son conservadores para el uso de áridos rodados.

Los restantes aspectos, relativos al transporte, preparación de hormigón y ejecución de obra, se abordan en el Capítulo 7. Las circunstancias de esta parte del sector, con abundancia de empresas de muy pequeño tamaño, dificulta la obtención de registros estadísticos conjuntos. Los procesos contemplados en el Capítulo 7 se estudian por medio de la información técnica que proporcionan los fabricantes de los equipos empleados en dichas tareas, así como mediante la literatura existente, y entrevistas con profesionales.

Finalmente, el Capítulo 7 también integra los resultados de los capítulos 4 al 7, en un modelo de cálculo que permite evaluar el impacto ambiental de una estructura de hormigón.

La información obtenida a través de estos cuatro capítulos permite trazar una imagen relativamente completa del impacto ambiental que ocasiona la construcción de una estructura de hormigón en España, identificando además la contribución a dicho impacto de cada proceso implicado.

3.4 ESTUDIO DE ASPECTOS ECONÓMICOS

Económicamente, los aspectos relacionados con la sostenibilidad del hormigón que se tratan en esta Tesis son, principalmente, los correspondientes a los costes y a la durabilidad y vida útil de las estructuras.

No se realiza un análisis de costes del ciclo de vida (ACCV), aunque sí se incluye en el Capítulo 8 un estudio de los costes asociados al diseño, construcción, mantenimiento y demolición de diferentes elementos estructurales, tomados de una base de datos comercial (CYPE, 2015). Por un lado, realizar dicho ACCV no era necesario aquí, ya que de lo que se trataba era de estimar unos órdenes de magnitud para determinadas variables, entre ellas el coste, con objeto de analizar la importancia relativa de las mismas. Por otro lado, esto hubiera supuesto un alcance del trabajo mucho mayor que el que se considera habitual para una Tesis Doctoral.

A continuación de la mencionada recopilación de costes (CYPE, 2015), se discute la relación entre sostenibilidad, vida útil y durabilidad. En este caso se han conjugado diversas reflexiones, apoyadas en consultas bibliográficas y en opiniones de expertos, con el objeto de sustentar el desarrollo que luego se ha hecho para esta parte económica del nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad.

3.5 ESTUDIO DE ASPECTOS SOCIALES

Los aspectos sociales son estudiados también el Capítulo 8, tomando como referencia principal la creación de empleo. En este sentido, se ha tratado de estimar el volumen de mano de obra generado en la construcción de una estructura de hormigón. Para ello se ha recurrido a información de bases de datos comerciales (CYPE, 2015; COATGU, 2013), que luego se ha integrado en un modelo de cálculo similar al desarrollado para la estimación del impacto ambiental. Partiendo de la referida información sobre creación de empleo, también se ha procedido a identificar los diferentes grupos de interés o partes implicadas que concurren en la construcción de una estructura de hormigón.

3.6 CONTRASTE DEL ANEJO 13 DE LA EHE CON LOS RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS EN EL MARCO DE ESTA TESIS

Para el cumplimiento de los dos primeros objetivos de la Tesis era necesario confrontar el Anejo 13 de la EHE-08 con los resultados obtenidos en los análisis de tipo ACV resumidos en los capítulos 4 a 8. Esta confrontación tenía por objeto, por un lado, establecer si la asignación de pesos que se otorga en la EHE a cada aspecto evaluado era suficientemente coherente con la situación real. Por otro lado, verificar si existían aspectos ambientales, económicos o sociales de relevancia que no hubiesen sido incluidos en la EHE.

Para apoyar las verificaciones anteriores se ha contado también con los resultados del análisis de sensibilidad del modelo de la EHE, realizado por Gómez (2012), en una Tesis anterior. Complementariamente a ello, se han empleado los resultados de aplicar el modelo de evaluación de impactos desarrollado en el Capítulo 7 a varios supuestos prácticos.

Los resultados del correspondiente contraste se ofrecen en el Capítulo 9 de esta Tesis.

3.7 DESARROLLO DEL NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN

El objetivo principal de la Tesis era el desarrollo de un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad, detallado en el Capítulo 10. Para ello ha sido necesario, por una parte, la realización de los estudios presentados en los capítulos 4 a 8, en los que se han analizado en detalle las tres vertientes de la sostenibilidad, aplicadas a la construcción de estructuras de hormigón en España.

Por otra parte, por razones ya explicadas con anterioridad, se ha decidido que el modelo propuesto fuese del mismo tipo que el usado en el Anejo 13 de la EHE-08, en vez del tipo ACV. De ahí la necesidad del análisis y contraste del modelo de la EHE, llevado a cabo en el Capítulo 9.

El nuevo modelo se ha desarrollado teniendo en cuenta los resultados de todos los trabajos de base resumidos en los capítulos anteriores de la Tesis, la información de la literatura existente y lo aportado por los profesionales consultados, tanto en entrevistas personales como en visitas a instalaciones.

En esencia, se ha empleado el enfoque conceptual de la parte medioambiental del Anejo 13 (del ISMA), corrigiendo los problemas detectados, y ampliándolo para que sea lo suficientemente completo, sin que resulte demasiado complicado recopilar la información que el nuevo modelo requiere. La organización del subíndice ambiental del nuevo modelo ha cambiado por completo para adaptarse, en sus líneas generales, a los resultados del ACV desarrollado en los capítulos 4 a 7. Por otro lado, se ha empleado un enfoque similar, basado en MIVES, para la valoración económica y social.

Las reflexiones sobre la durabilidad reflejadas en el Capítulo 8 dan lugar a una evaluación de los aspectos económicos en la que las características de utilización y periodo de servicio de la estructura determinan la elección de un tipo de indicador u otro. Se añaden además aspectos relacionados con los costes y con la funcionalidad de las estructuras.

En la evaluación de la parte social, se opta por valorar dichos aspectos de forma independiente para cada uno de los tipos de empresa implicados, para integrar posteriormente los resultados en un índice único, por medio de una ponderación basada en la contribución estimada de cada grupo al volumen total de mano de obra.

3.8 APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO

Una vez construido el nuevo modelo de evaluación, restaba comprobar su aplicabilidad, por medio de su empleo en un caso práctico. Esto se aborda en el Capítulo 11, utilizando una estructura sencilla proyectada por Arroyo et al. (2011), y evaluada por dichos autores de acuerdo con el modelo de la EHE. A la información que proporcionan dichos autores se han añadido los oportunos datos adicionales que requiere el nuevo modelo, que se han establecido de forma coherente con la realidad estudiada a lo largo de la Tesis. Para que la comprobación no se limitase a un solo caso, se han introducido variaciones a los datos de partida para analizar su influencia sobre los resultados obtenidos.

3.9 ESTABLECIMIENTO DE CONCLUSIONES

Cada uno de los capítulos de la Tesis ofrece un epígrafe final de síntesis y conclusiones. Al margen de ellas, y sin repetir las, se ofrece en el Capítulo 12 un conjunto de conclusiones globales, relativas al cumplimiento de los objetivos, a la identificación de las limitaciones de los trabajos desarrollados, y a los posibles trabajos futuros sobre esta temática.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES. PARTE I: EL CEMENTO

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES. PARTE I: EL CEMENTO.

4.1 INTRODUCCIÓN

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

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

Dentro de los trabajos englobados en la presente Tesis, el doctorando realizó un primer estudio de este tipo, para el cual se empleó información extraída de las Declaraciones Ambientales de una decena de fábricas españolas que están certificadas según el reglamento EMAS (Parlamento Europeo, 2009). Esta información fue completada mediante la consulta de numerosas fuentes bibliográficas, así como con otros estudios de similar alcance realizados previamente en otros países. De forma no exhaustiva, se pueden citar las referencias Josa et al. (2007), Cagiao (2011), Flower y Sanjayan (2007), y Marceau et al. (2010). Este estudio fue publicado en una revista indexada (Mel et al., 2013).

Posteriormente se pudo acceder a información adicional, y se procedió a la elaboración de un análisis más detallado, en este caso empleando datos de la totalidad de las plantas de producción de clinker en operación en España durante el período 2006-2010. Esta información, similar a la aportada en las Declaraciones Ambientales consultadas anteriormente, procede de las memorias estadísticas anuales de OFICEMEN, organización patronal que aglutina a la mayoría de los productores de cemento y clinker españoles (OFICEMEN, 2012b). Para la comprensión del sector español del cemento ha sido también de gran ayuda la visita realizada a la fábrica de Cementos Cosmos (Grupo CIMPOR) en Sarria (Lugo) y las conversaciones mantenidas con varios profesionales de esta instalación (CIMPOR, 2012).

Este segundo análisis ha resultado esencialmente coherente con el anterior, siendo más completo y riguroso, y ha sido el que se ha empleado como base para el desarrollo de la parte ambiental del

nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de esta Tesis, conjuntamente con los estudios realizados sobre la producción de acero y áridos y sobre la preparación, transporte y ejecución del hormigón, que se verán en capítulos posteriores. El desarrollo y resultados de este segundo análisis se ofrecen en el presente capítulo. Los aspectos relacionados con el consumo de energía y las emisiones de CO₂ abordados en este capítulo, que constituyen los aspectos más importantes, han sido publicados en un congreso internacional (Mel et al., 2014a).

4.2 METODOLOGÍA

4.2.1.- Planteamiento general

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

Aunque el CO₂ es el contaminante que se ha tomado como referencia, en base a su elevado nivel de emisión y a su influencia ambiental, se ha decidido complementar la evaluación de aspectos ambientales con la determinación de los factores de emisión de otras sustancias; en particular, de NO_x, SO_x, VOC, CO, y PM₁₀. Estos factores permiten ilustrar mejor este problema multidimensional, si bien siguen sin ser suficientes para poder considerar que el análisis es exhaustivo, abarcando todos los indicadores ambientales indicados por Heijungs et al. (1992). De hecho, en puridad, ni siquiera el catálogo de indicadores propuesto por estos autores puede considerarse completo. El software comercial con bases de datos especializadas puede aportar datos sobre un mayor número de indicadores que el aquí incluido, pero esto no siempre es así y, por otro lado, esas bases de datos no están particularizadas al caso español, o por lo menos no lo están de forma completa. Finalmente, los resultados de conjunto y las conclusiones del trabajo deberían ser los mismos con un número mayor de indicadores, toda vez que se ha teniendo en cuenta el conjunto de indicadores más importante.

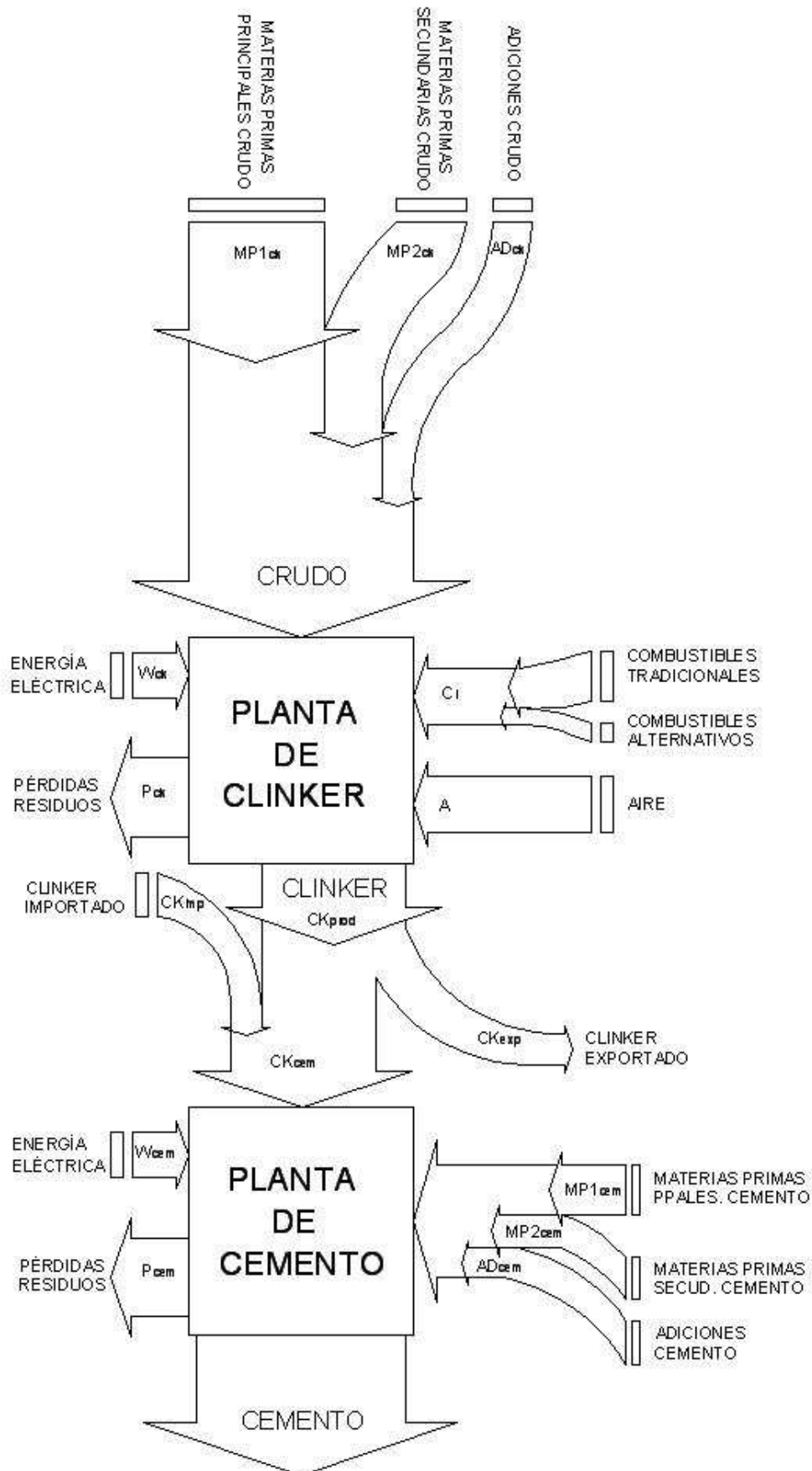
En particular, los aspectos que se analizan en el presente trabajo son:

- (i) El empleo de combustibles en el interior de las plantas de producción, principalmente en los hornos de calcinación de clinker.
- (ii) El empleo de energía eléctrica en las instalaciones de producción.
- (iii) La extracción de materias primas de canteras.
- (iv) El transporte de materias primas y combustibles hasta la fábrica.
- (v) El ciclo de vida de la propia planta de producción.

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

Conviene, a la hora de analizar los procesos, diferenciar la producción de clinker de la de cemento. La producción de clinker emplea una gran parte de las materias primas totales, tanto naturales como

alternativas, y la práctica totalidad de los combustibles. El clinker producido pasa a la línea de producción de cemento, donde es molido junto con otras materias primas y almacenado para su expedición. Raras veces las fábricas funcionan de modo aislado, siendo frecuentes los intercambios de clinker entre diferentes unidades de producción. Así, una planta puede exportar parte de su clinker y fabricar cemento con el resto, o al contrario, importar clinker procedente del exterior y fabricar más cemento del que permitiría su producción primaria. Vistos los resúmenes estadísticos, es habitual que las fábricas alternen dentro de un mismo ejercicio importaciones y exportaciones, en función de su ritmo de producción y las demandas del mercado. La figura F4.1 representa un diagrama de flujo simplificado del proceso a estudiar, indicando las entradas, salidas y fronteras del mismo.



F4.1.- Diagrama de flujo del proceso de producción de cemento en una planta integral. Fuente: elaboración propia.

4.2.2.- Formulación para el cálculo energético

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

$$E_{\text{clinker}} = E_{\text{combustibles}} + E_{\text{electricidad ck}} + E_{\text{extracción MMPP ck}} + E_{\text{transportes ck}} + E_{\text{CVplanta ck}} \quad [\text{E4.1}]$$

El primer sumando de la expresión [E4.1] contempla la energía asociada al empleo de combustibles, tanto fósiles como alternativos:

$$E_{\text{combustibles}} = \sum_i C_i \cdot \text{VCN}_i \cdot \text{FEP}_{C_i} \quad [\text{E4.2}]$$

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

Para los combustibles tradicionales se han tomado los VCN aportados por la Comisión Europea (Unión Europea, 2007). Para la hulla, que no aparece explícitamente en dicha relación, se ha empleado el valor indicado en la columna “otros carbones bituminosos” de la mencionada publicación. Ante el empleo de combustibles alternativos, generalmente constituidos por residuos de otros procesos o actividades, resulta de mayor dificultad conocer, sin acceso a los análisis efectuados por cada planta, el poder energético de los mismos. Se toman como referencia los PCI indicados en Carrasco et al. (2003) para biomásas diferentes de la madera, plásticos, lodos industriales (asimilados a “lodos y alquitranes ácidos – destilación del petróleo”), textiles y residuos sólidos urbanos (RSU). En los restantes casos se emplean valores indicados por la Unión Europea (2007), asimilando dentro de la categoría de “aceites usados” a los disolventes, pinturas, aguarrás y alcohol industrial, y a los “residuos de hidrocarburos”, como los alquitranes.

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

Teniendo en cuenta que todos los cálculos se han realizado sobre una base anual, el término correspondiente a la energía eléctrica de la expresión [E4.1] es de sencilla obtención, multiplicando el consumo eléctrico W_{ck} de la planta de clinker durante el periodo considerado por el factor de energía primaria asociado a la electricidad, FEP_e :

$$E_{\text{electricidad ck}} = W_{\text{ck}} \cdot \text{FEP}_e \quad [\text{E4.3}]$$

Los datos estadísticos ofrecidos por OFICEMEN no desagregan el consumo eléctrico de las instalaciones de clinker y cemento, sino que ofrecen un único dato. Basándose en la información obtenida a partir de dos plantas que sí ofrecen ambos datos por separado, se puede asumir la

hipótesis de que dicho consumo se reparte al 50% entre ambas instalaciones. De esta forma, $W_{ck} = \frac{1}{2} \cdot W$, siendo W el consumo eléctrico total de la planta industrial.

El cálculo de FEP_e se detalla en el Anejo 2 (Mel et al. 2013). Este factor marca la cantidad de energía primaria asociada a una unidad de medida de energía eléctrica producida, teniendo en cuenta los consumos energéticos y de ciclo de vida de las unidades de producción, así como sus rendimientos. Debe ser determinado para cada año, debido a que circunstancias económicas, tecnológicas o climatológicas pueden causar variaciones en el mismo. En España, la tendencia sostenida durante los últimos años es de una disminución continuada, debido a la mejora tecnológica (sustitución de centrales de carbón por plantas de ciclo combinado) y al incremento de generación mediante energías renovables.

Pasemos ahora al término correspondiente a la energía eléctrica necesaria para la extracción de materias primas (MMPP), incluido en la expresión [E4.1]. La fórmula usada aquí es:

$$E_{extracciónMMPP\ ck} = \sum_i M_{1i} \cdot FE_{extr} \quad [E4.4]$$

Las materias primas principales para la producción de clinker (calizas y margas) son extraídas de cantera, en general, mediante el empleo de maquinaria diesel y explosivos. Se ha empleado la información procedente de las Declaraciones Ambientales de varias plantas españolas (Cementos Portland Valderribas 2009, 2009b, 2010, 2010b, 2010c, 2010d, 2010e, 2010f; CEMEX 2009, 2010) para estimar la contribución energética de los explosivos. Por su parte, el funcionamiento de la maquinaria con motor de combustión, se ha tratado como un transporte. Con ello se ha calculado el factor de energía en extracción, FE_{extr} .

A su vez, en la expresión [E4.4] M_{1i} representa la cantidad de cada materia prima extraída de cantera, de las denominadas materias primas minerales o principales. Cuando las canteras se encuentran muy próximas a la fábrica, cosa habitual que no siempre ocurre, el transporte puede efectuarse mediante cintas transportadoras accionadas por electricidad. En este caso, el consumo eléctrico se encuentra ya contemplado dentro de la expresión [E4.3].

Para valorar el sumando correspondiente a la energía usada en los procesos de transporte incluido en la expresión [E4.1], resulta necesario tener en cuenta que existen diferentes tipos de materiales que deben ser transportados, y que las distancias de transporte son diferentes, dependiendo del material y de su origen. Los medios de transporte empleados pueden ser los relativos a la carretera, al ferrocarril, o al transporte marítimo. En 2005 se transportaron por carretera el 85% de las toneladas-km movidas en España (Pérez y Monzón, 2008). Por ello el caso más desfavorable que se contempla en este estudio es que todos los transportes se efectúen por carretera mediante camiones. Obviamente, en algunos casos de este sector se emplean los otros medios citados, más eficientes. El término energético asociado al transporte en la expresión [E4.1] se compone, por tanto, de varios sumandos:

$$E_{transportes\ ck} = E_{tMMPP1\ ck} + E_{tMMPP2\ ck} + E_{tad\ ck} + E_{tcomb} \quad [E4.5]$$

$E_{tMMPP1\ ck}$ y $E_{tMMPP2\ ck}$ representan, respectivamente, el transporte de materias primas principales (procedentes de cantera) y secundarias empleadas en el crudo. $E_{tad\ ck}$ corresponde al transporte de adiciones para el crudo y E_{tcomb} al transporte de combustibles. Todos los términos se determinan a partir de la expresión genérica [E4.6]:

$$E_{tx} = \sum_i M_{xi} \cdot D_{xi} \cdot IE_x \quad [E4.6]$$

Donde E_{tx} es la energía asociada al transporte de cada uno de los términos que aparecen en [E4.5], M_{xi} la cantidad de cada material transportado dentro de cada categoría (por ejemplo, dentro del término de transporte de adiciones se pueden transportar cenizas volantes y humo de sílice), D_{xi} la distancia a la que se realiza cada transporte e IE_x la intensidad energética del medio de transporte empleado.

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

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

Los combustibles tradicionales proceden de las refinerías (coque de petróleo, fuelóleo, gasóleo), salvo la hulla y el gas natural, la primera procedente de cuencas mineras nacionales o extranjeras, y el segundo transportado por tubería desde las plantas regasificadoras. A la vista de los datos estadísticos disponibles, la mayoría del coque y de la hulla son importados y transportados por vía marítima; los combustibles de origen nacional proceden de alguna de las nueve refinerías existentes en España. Para el transporte de estos productos por carretera se ha considerado una distancia media de 300 km. Para los combustibles de importación se ha supuesto una distancia marítima media de 5.000 km. Para los combustibles alternativos se ha tomado 100 km como distancia media, ya que suelen proceder de distancias cortas o medias, si bien es verdad que para algunos, como los neumáticos fuera de uso (NFUs), puede ser rentable su transporte a distancias mayores.

La intensidad energética IE_x asociada al transporte por carretera procede de la referencia Pérez y Monzón (2008), incrementada en un 5%, para incluir el impacto del ciclo de vida de los vehículos; este porcentaje se ha estimado, de forma conservadora, en base a la información aportada por algunos autores, como Eriksson et al. (1996), por ejemplo. En Pérez y Monzón (2008) se indica también la intensidad energética del transporte marítimo internacional, que se ha decidido incrementar en un 1%, para tener en cuenta las emisiones durante el ciclo de vida de los buques empleados; este porcentaje se ha estimado de forma paralela al anterior (Eriksson et al. 1996, entre otros). De todas formas, en el Anejo 3 se detalla al completo el modo de determinar la intensidad energética IE_x asociada al transporte por carretera.

Pasemos ahora al último sumando de la fórmula [E4.1]. La energía asociada al ciclo de vida de la planta industrial, cantera e instalaciones auxiliares (construcción, mantenimiento y desmantelamiento de las mismas, principalmente) se ha estimado en un 5% de la energía consumida, a falta de datos concretos que permitan una aproximación más fidedigna. En Rosado (1997) se indica que el coste aproximado anual de los desgastes en plantas cementeras es del orden del 5% de la facturación, lo que si bien no tiene directamente que ver con los aspectos energéticos del ciclo de vida, sí confirma el orden de magnitud supuesto. Por tanto, el último sumando de la expresión [E4.1] queda:

$$E_{CVplanta\ ck} = 0,05 \cdot (E_{combustibles} + E_{electricidad\ ck} + E_{extracción\ MMPP\ ck}) \quad [E4.7]$$

Hasta aquí todo lo relativo a la manera de calcular la expresión [E4.1]. A partir de ella, la energía específica del clinker, E_{eck} , se obtiene del cociente entre $E_{clinker}$, calculada mediante la fórmula [E4.1], y la producción total de clinker de la planta considerada:

$$E_{eck} = E_{clinker} / Ck_{producido} \quad [E4.8]$$

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

$$Ck_{cem} = (Ck_{producido} - Ck_{exportado}) + Ck_{importado} \quad [E4.9]$$

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

$$E_{cemento} = E_{Ck\ cem} + E_{electricidad\ cem} + E_{extracción\ MMPP\ cem} + E_{transportes\ cem} + E_{CVplanta\ cem} \quad [E4.10]$$

Los términos relativos a electricidad, extracción de materias primas, transportes y ciclo de vida son análogos a los definidos para la producción de clinker. La energía correspondiente al clinker se valora de forma diferente según se trate del producido en la propia planta (para el que se emplea la energía específica calculada mediante la fórmula [E4.8]) o del clinker importado. En este último caso, debe señalarse que se considera un valor de energía específica $E_{eck\ importado}$ de 6 GJ/t, más alto que el obtenido en el presente análisis, al proceder, en muchos casos, de terceros países. También se incluye, dentro del término de transportes, la energía correspondiente a un viaje por mar de 5.000 km de este clinker importado. Con ello, la fórmula usada para la energía incorporada al clinker queda:

$$E_{Ck\ cem} = (Ck_{producido} - Ck_{exportado}) \cdot E_{eck} + Ck_{importado} \cdot E_{eck\ importado} \quad [E4.11]$$

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

$$E_{ecem} = E_{cemento} / Cem_{total} \quad [E4.12]$$

A modo de resumen, en las tablas T4.1 a T4.4 se recogen los diferentes parámetros de cálculo citados previamente, con alusión a la referencia de la que proceden.

COMBUSTIBLE	VCN (GJ/t)	FEP _e	REFERENCIA
Coke de petróleo	32,50	1,085	Comisión Europea, 2007 Furuholt, 1995
Fuelóleo	40,40		
Gas natural	48,00		
Gasóleo	43,00		
Hulla	25,80		
Aceites usados, disolventes, pinturas	40,20	1,000	Comisión Europea, 2007
Plásticos	26,40		Carrasco et al., 2003
Neumáticos fuera de uso (NFU)	38,10		Comisión Europea, 2007
Lodos industriales	15,90		
Residuos de hidrocarburos	28,00		
Residuos sólidos urbanos (RSU)	8,40		Carrasco et al., 2003
Textiles	18,00		
Serrín, madera	15,90		
Biomásas vegetales	11,60		
Harinas animales	18,40		
Lodos EDAR	10,00		
Papel y cartón	15,10		

Tabla T4.1.- Valores caloríficos netos y factores de energía primaria para combustibles tradicionales y alternativos.

Año	FEP _e (GJ/MWhe)
2010	6,20
2009	7,06
2008	7,42
2007	8,23
2006	8,06

Tabla T4.2.- Factor de energía primaria asociado a la producción de energía eléctrica. Fuente: véase Anejo 1.

CONCEPTO		REFERENCIA
Consumo de explosivo ($t_{\text{explosivo}}/t_{\text{material extraído}}$)	0,000157	(*)
Factor energético explosivo (MJ/kg)	4,80	Maxam, 2012
Intensidad energética transporte en camión (MJ/t-km)	1,4 (+5%)	Pérez y Monzón, 2008 (Eriksson et al., 1996)
Intensidad energética transporte marítimo internacional (MJ/t-km)	0,2 (+1%)	Pérez y Monzón, 2008 (Eriksson et al., 1996)

Tabla T4.3.- Aspectos energéticos de la extracción de materias primas y de los procesos de transporte.

(*) Elaboración propia a partir de Cementos Portland Valderribas (2009, 2009b, 2010, 2010b, 2010c, 2010d, 2010e, 2010f).

MATERIAL	DISTANCIA TRANSPORTE (KM)
Materias primas principales (calizas, margas, pizarras)	1
Materias primas secundarias (correctores, lodos, etc)	100
Adiciones (cenizas volantes, escorias de alto horno, etc; se incluye el yeso)	300
Combustibles de origen nacional	300
Combustibles importados	5000
Combustibles alternativos	100
Clinker importado	5000

Tabla T4.4.- Distancias de transporte consideradas en el cálculo, para cada material.

4.2.3.- Formulación para el cálculo de las emisiones de CO₂

La determinación de las emisiones de CO₂ que corresponden a la fabricación de clinker y cemento se lleva a cabo de un modo análogo al ya seguido en 4.2.2 para el estudio del consumo energético. La principal particularidad es la aparición de un nuevo término, en este caso debido a la descarbonatación de las materias primas durante el proceso de clinkerización, según la reacción $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$. La fórmula usada para las emisiones de CO₂ por causa del clinker es:

$$G_{\text{clinker}} = G_{\text{descarbonatación}} + G_{\text{combustible}} + G_{\text{electricidad ck}} + G_{\text{extracciónMMPP ck}} + G_{\text{transporte ck}} + G_{\text{CVplanta ck}} \quad [E4.13]$$

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

Por su parte, las emisiones debidas al uso de combustibles pueden determinarse de una forma análoga a su consumo energético, en función de la cantidad consumida de cada combustible (C_i), el

factor de emisión de los mismos por unidad de masa (FG_{Ci}) y un coeficiente que tenga en cuenta las emisiones generadas durante la extracción y procesado de los combustibles (FG_{PCi}).

$$G_{\text{combustible}} = \sum_i C_i \cdot FG_{Ci} \cdot FG_{PCi} \quad [E4.14]$$

FG_{PCi} toma un valor de 1,10 para los combustibles fósiles, según Furuholt (1995); su significado es que la producción de los combustibles conlleva aproximadamente un 10% de las emisiones que posteriormente se producirán en su combustión. Las emisiones directas informadas por las plantas no incluyen esta estimación, sino únicamente el factor de emisión del combustible. Teniendo esto en cuenta, la expresión [E4.14] puede escribirse como:

$$G_{\text{combustible}} = \sum_i C_i \cdot FG_{Ci} + \sum_i C_i \cdot FG_{Ci} \cdot (FG_{PCi} - 1) = G_{\text{comb.directas}} + G_{\text{producción comb.}} \quad [E4.15]$$

A partir de [E4.15] se puede definir la expresión [E4.16], en la se estiman las emisiones debidas a la descarbonatación en función de las emisiones directas registradas por la planta, y de las emisiones directas del combustible:

$$G_{\text{descarbonatación}} = G_{\text{directas}} - G_{\text{comb.directas}} \quad [E4.16]$$

Los factores de emisión FG_{Ci} empleados son los que propone la Unión Europea (2007), donde no todos los combustibles alternativos aparecen reflejados. Con respecto a los combustibles alternativos no contemplados en dicha publicación, se ha optado por asimilarlos a las categorías más afines entre las existentes, y en caso de duda se ha optado por las emisiones más desfavorables (en general, las correspondientes a los NFUs). A los combustibles alternativos de origen biológico se les asigna, según la Unión Europea (2007), un factor de emisión nulo, dado su carácter de recurso renovable. En la tabla T4.5 se recogen los factores de emisión empleados.

Las emisiones debidas al consumo de energía eléctrica durante la producción de clinker se determinan a través del factor de emisión FG_e , cuya determinación se detalla en el Anejo 1 (Mel et al. 2013). Al igual que el factor de energía primaria correspondiente, éste es variable según la combinación de tecnologías empleadas en la producción, y debe determinarse para cada año. Ya se ha indicado anteriormente que se asume que el consumo total de energía eléctrica de una fábrica se reparte equitativamente entre las líneas de producción de clinker y de cemento. Con todo ello, la fórmula usada para las emisiones por consumo eléctrico es:

$$G_{\text{electricidad ck}} = W_{ck} \cdot FG_e \quad [E4.17]$$

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

$$G_{\text{extracciónMMPP ck}} = \sum_i M_{1i} \cdot FG_{\text{extr}} \quad [E4.18]$$

Las emisiones debidas al transporte se determinan empleando las mismas hipótesis y distancias establecidas en 4.2.2 (Tabla T4.4). Los factores de emisión de gases IG_x asociados a los transportes se toman de Pérez y Monzón (2008), incrementados un 5% para vehículos terrestres, y un 1% en el caso del transporte marítimo, por las razones ya comentadas con anterioridad. La estimación de las emisiones de NO_x , SO_x , VOC, CO y PM_{10} se baso en datos de la referencia EEA (2013). El Anejo 3

recoge el detalle completo de estos cálculos. Con todo ello, las fórmulas usadas para las emisiones debidas al transporte son:

$$G_{\text{transportes ck}} = G_{\text{tMMPP1 ck}} + G_{\text{tMMPP2 ck}} + G_{\text{tad ck}} + G_{\text{tcomb}} \quad [\text{E4.19}]$$

$$G_{\text{tx}} = \sum_i M_{xi} \cdot D_{xi} \cdot IG_x \quad [\text{E4.20}]$$

Las emisiones debidas al ciclo de vida de la línea de clinker se estiman de forma acorde a lo indicado en 4.2.2, como un 5% de las emisiones correspondientes a los procesos de combustión, electricidad y extracción de materias primas (MMPP):

$$G_{\text{CVplanta ck}} = 0,05 \cdot (G_{\text{combustibles}} + G_{\text{electricidad ck}} + G_{\text{extracción MMPP ck}}) \quad [\text{E4.21}]$$

Hasta aquí todo lo necesario para evaluar la fórmula [E4.13]. A partir de ella, la emisión específica de CO₂ para el clinker, G_{eck} , se obtiene del cociente entre G_{clinker} , calculado mediante dicha fórmula [E4.13], y la producción total de clinker de la planta considerada:

$$G_{\text{eck}} = G_{\text{clinker}} / Ck_{\text{total}} \quad [\text{E4.22}]$$

De forma análoga a lo ya dicho en 4.2.2, en la producción de cemento concurren las emisiones correspondientes al clinker producido y al importado desde el exterior, y las correspondientes a la energía eléctrica, transportes, extracción de materias primas y ciclo de vida de la línea de cemento:

$$G_{\text{cemento}} = G_{\text{Ck cem}} + G_{\text{electricidad cem}} + G_{\text{extracción MMPP cem}} + G_{\text{transportes cem}} + G_{\text{CVplanta cem}} \quad [\text{E4.23}]$$

$$G_{\text{Ck cem}} = (Ck_{\text{producido}} - Ck_{\text{exportado}}) \cdot G_{\text{eck}} + Ck_{\text{importado}} \cdot G_{\text{eck importado}} \quad [\text{E4.24}]$$

Dividiendo las emisiones anuales así obtenidas por la producción total de cemento se obtiene la emisión de CO₂ específica del cemento, G_{ecem} .

$$G_{\text{ecem}} = G_{\text{cemento}} / Cem_{\text{total}} \quad [\text{E4.25}]$$

En las tablas T4.5 a T4.7 se incluyen los factores de emisión considerados en los cálculos.

COMBUSTIBLE	FG _{ci} (tCO ₂ /t)	FG _{pc}	REFERENCIA
Coke de petróleo	3,169	1,10	Carrasco et al., 2003 Furuholt, 1995
Fuelóleo	3,123		
Gas natural	2,693		
Gasóleo	3,182		
Hulla	2,438		
Aceites usados	2,947	1,00	
Disolventes y pinturas	2,935		
Plásticos	2,244		
Neumáticos fuera de uso (NFU)	3,239		
Lodos industriales	2,272		
Residuos de hidrocarburos	2,257		
Residuos sólidos urbanos (RSU)	0,714		
Textiles	1,530		
Serrín, madera	0,00		
Biomásas vegetales	0,00		
Harinas animales	0,00		
Lodos EDAR	0,00		
Papel y cartón	0,00		

Tabla T4.5.- Factores de emisión de CO₂ durante su producción y consumo para combustibles tradicionales y alternativos.

Año	FG _e (tCO ₂ /MWhe)
2010	0,301
2009	0,368
2008	0,394
2007	0,446
2006	0,433

Tabla T4.6.- Factor de emisiones de CO₂ asociado a la producción de energía eléctrica. Fuente: véase Anejo 1.

CONCEPTO		REFERENCIA
Factor emisiones explosivo (tCO ₂ /t)	0,180	Flower y Sanjayan, 2007
Factor emisión transporte en camión (gCO ₂ /t-km)	96,9 (+ 5%)	Pérez y Monzón, 2008 (Eriksson et al., 1996)
Factor emisión transporte marítimo internacional (gCO ₂ /t-km)	13,90 (+1%)	Pérez y Monzón, 2008 (Eriksson et al., 1996)

Tabla T4.7.- Factores de emisión de la extracción de materias primas y de los procesos de transporte.

4.2.4.- Formulación para el cálculo de las emisiones de otros contaminantes

A diferencia de lo que ocurre con el CO₂, no ha sido posible disponer de registros estadísticos de las cantidades emitidas de otros contaminantes; en particular, de NO_x, SO_x, VOC, CO, y PM₁₀. Para complementar el estudio con las emisiones de estas sustancias se recurre a una formulación más simplificada que las anteriores, acorde a los datos disponibles.

La Agencia Medioambiental Europea (*European Environment Agency*, EEA, 2013) proporciona factores de emisión en función del contaminante y del sector o instalación en el que se produzca. En EEA (2013) se obtienen factores de emisión de la producción de clinker, para las sustancias antes aludidas (NO_x, SO_x, VOC, etc.); a ellos se deben añadir las emisiones debidas al consumo de energía eléctrica durante la molienda del clinker y durante la producción de cemento, estimadas por el doctorando a partir de los registros de las cementeras españolas. También se deben añadir las emisiones correspondientes al transporte de materias primas. Para la extracción de material en canteras se toma, de la misma fuente, un factor de emisión de PM₁₀. En los Anejos 2 y 3, respectivamente, se detallan los cálculos que se han realizado para estimar los factores correspondientes a electricidad y transporte. La Tabla 4.8 recopila los factores de emisión recogidos en EEA (2013) para los contaminantes ya aludidos, en la extracción de cantera y en la producción de clinker.

Concepto	Producción de clinker					Extracción de cantera
	NOx (g/t)	CO (g/t)	VOC (g/t)	SOx (g/t)	PM10 (g/t)	PM10 (g/t)
min	330	460	2,3	20	117	25
med	1241	1455	18	374	234	50
max	4670	4600	138	11120	468	100

Tabla T4.8.- Factores de emisión de otros contaminantes para la producción de clinker. Fuente: EEA (2013).

Llamando J_i a la cantidad emitida del contaminante i, se establece la siguiente expresión, referida a la producción de cemento:

$$J_i = J_{i \text{ prod. clinker}} + J_{i \text{ transporte}} + J_{i \text{ electricidad}} + J_{i \text{ extracciónMMPP}} \quad [E4.26]$$

Los sumandos primero y último de dicha fórmula son los correspondientes a la Tabla 4.8, y los otros dos sumandos son los que se han obtenido mediante los cálculos realizados en los anejos 2 y 3.

Dividiendo las emisiones anuales obtenidas mediante [E4.26] entre la producción total de cemento se obtiene la emisión de cada contaminante, específica para el cemento, J_{icem}.

$$J_{icem} = J_i / Cem_{total} \quad [E4.27]$$

Como se observa en la Tabla 4.8, la amplitud de los rangos de valores es muy elevada, especialmente en algunos casos, como el de los SO_x. Para obtener datos de mayor precisión sería necesario realizar un estudio de otra clase, que se sale del alcance de esta Tesis.

4.2.5.- Origen y calidad de los datos

Como se ha indicado, los datos estadísticos empleados para la elaboración de este trabajo proceden de las memorias estadísticas de OFICEMEN correspondientes a los años 2006 a 2010 (OFICEMEN, 2012). Cada una de estas memorias se estructura como un conjunto de tablas que recogen los datos ofrecidos por cada una de las instalaciones en lo referente a producción, ventas, importaciones, exportaciones, consumos energéticos, eléctricos y de materias primas (tanto naturales como alternativas). Las tablas incluyen la decena de instalaciones de molienda sin horno de clinker asociadas a OFICEMEN. En este trabajo no han sido tenidas en cuenta, ciñéndose al análisis de las plantas de ciclo integral. La Tabla T4.9 presenta el conjunto de fábricas analizadas, su capacidad y el número de hornos de que disponen.

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

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

Determinar las relaciones crudo/clinker y clinker/cemento para cada fábrica y año es sencillo con los datos disponibles, y permite detectar posibles errores en la recopilación de datos o la falta de alguna variable importante no recogida explícitamente en las estadísticas, como podría ser el almacenamiento de productos intermedios. Relaciones crudo/clinker menores que 1 o relaciones clinker/cemento mayores que 1 son incoherentes, y por lo tanto los datos correspondientes a la fábrica y año en que se detecta alguna de estas dos circunstancias no son tenidos en cuenta a la hora de determinar los valores medios resultantes. Las tablas T4.10 y T4.11 recogen ambas ratios. En ellas se han señalado con un asterisco las ratios correspondientes a los años en los que alguna de las dos es inconsistente.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Fábrica	Empresa	Nº Hornos		Capacidad clinker (t/día)	
		V.Seca	V.Húmeda	Gris	Blanco
A.G.BALBOA	AG CEMENTOS BALBOA	1	-	3237	-
ABOÑO	TUDELA VEGUÍN	1	3	3950	-
ALCALA DE GUADAIRA	CEMENTOS PORTLAND VALDERRIBAS	1	-	3800	-
ALCANAR	CEMEX ESPAÑA	3	-	5455	-
AÑORGA	S. FINANCIERA Y MINERA (ITALCEMENTI)	1	-	1920	-
ARRIGORRIAGA	S. FINANCIERA Y MINERA (ITALCEMENTI)	1	-	1560	-
BUÑOL	CEMEX ESPAÑA	3	-	2062	2600
CARBONERAS	HOLCIM ESPAÑA	1	-	2904	-
CASTILLEJO	CEMEX ESPAÑA	2	-	4545	-
CORDOBA	S. CEMENTOS Y MATERIALES (CIMPOR)	1	-	2200	-
GADOR	HOLCIM ESPAÑA	1	-	2200	-
HONTORIA	CEMENTOS PORTLAND VALDERRIBAS	1	-	2200	-
JEREZ	HOLCIM ESPAÑA	1	-	2256	-
LA ROBLA	TUDELA VEGUÍN	1	-	3000	-
LEMONA	CEMENTOS PORTLAND VALDERRIBAS	1	-	2250	-
LORCA	HOLCIM ESPAÑA	1	-	1850	-
LLOSETA	CEMEX ESPAÑA	2	-	1700	-
MALAGA	S. FINANCIERA Y MINERA (ITALCEMENTI)	1	-	3480	-
MATAPORQUERA	CEMENTOS PORTLAND VALDERRIBAS	1	-	1950	-
MONJOS	CEMENTOS PORTLAND VALDERRIBAS	2	-	5800	-
MONTCADA	LAFARGE ASLAND	1	-	2100	-
MORATA DE JALON	CEMEX ESPAÑA	2	-	2939	-
MORATA DE TAJUÑA	CEMENTOS PORTLAND VALDERRIBAS	3	-	7000	950
NIEBLA	S. CEMENTOS Y MATERIALES (CIMPOR)	1	-	1500	-
OLAZAGUTIA	CEMENTOS PORTLAND VALDERRIBAS	2	-	3100	-
OURAL	CEMENTOS COSMOS (CIMPOR)	1	-	1300	-
SAGUNTO	LAFARGE ASLAND	2	-	3500	425
SAN FELIU DE LLOBREGAT	CEMEX ESPAÑA	2	-	3248	-
SAN VICENC DEL HORTS	CEMENTOS MOLINS INDUSTRIAL	5	-	4100	-
SAN VICENTE DEL RASPEIG	CEMEX ESPAÑA	1	-	3415	1100
TORAL DE LOS VADOS	CEMENTOS COSMOS (CIMPOR)	1	-	2600	-
TORREDONJIMENO	HOLCIM ESPAÑA	1	-	750	-
TUDELA VEGUIN	TUDELA VEGUÍN	1	-	-	400
VALLCARCA	CEMENTOS PORTLAND VALDERRIBAS	2	-	3700	-
VILLALUENGA	LAFARGE ASLAND	2	-	5200	-
YELES	HOLCIM ESPAÑA	2	-	1900	-

TablaT4.9.- Fábricas de cemento analizadas, nº de hornos y capacidad. Fuente: OFICEMEN (2012b).

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Fábrica	Relación crudo/clinker						
	2006	2007	2008	2009	2010	Media	Desv.
A.G.BALBOA	1,402	1,592	1,516	1,416	1,554	1,496	0,084
ABOñO	0,773 (*)	0,719(*)	0,608(*)	0,639(*)	0,801(*)	-	-
ALCALA DE GUADAIRA	1,677	1,655	1,667	1,621	1,610	1,646	0,029
ALCANAR	1,538	1,454	1,496	1,547	1,483	1,504	0,039
AÑORGA	1,424	1,506	1,554	1,543	1,557	1,517	0,056
ARRIGORRIAGA	1,558	1,564	1,557	1,562	1,558	1,560	0,003
BUñOL	1,621	1,632	1,551	1,610	1,638(*)	1,604	0,036
CARBONERAS	1,567	1,460	1,515(*)	1,503	1,428(*)	1,510	0,054
CASTILLEJO	1,539	1,564	1,553	1,561	1,509	1,545	0,022
CORDOBA	0,0739(*)	0,092(*)	0,888(*)	1,704	1,679	1,691	0,018
GADOR	1,807	1,646	1,625	2,071	1,942	1,818	0,191
HONTORIA	1,684	1,774	1,450	1,663	1,587	1,632	0,122
JEREZ	1,455	1,446	1,414	1,432	1,747	1,499	0,139
LA ROBLA	1,621	1,697	1,675	1,661(*)	1,647(*)	1,664	0,039
LEMONA	1,202	1,255	1,351	1,267	1,315	1,278	0,057
LORCA	1,614	1,646	1,270	1,434	1,504(*)	1,491	0,174
LLOSETA	1,557	1,560	2,037	1,546	1,119	1,564	0,325
MALAGA	1,650	1,510	1,705	1,669	1,228	1,552	0,196
MATAPORQUERA	1,571	1,567	1,567	1,879	1,559	1,629	0,140
MONJOS	1,655	1,553	1,677	1,655	1,669	1,642	0,050
MONTCADA	1,454	1,635	1,603	1,609	1,598	1,580	0,072
MORATA DE JALON	1,481	1,543	1,533	1,543	1,550	1,530	0,028
MORATA DE TAJUÑA	1,662	1,678	1,613	1,674	1,663	1,658	0,026
NIEBLA	0,0296(*)	1,110	1,573	1,659	1,633(*)	1,447	0,295
OLAZAGUTIA	1,704	1,729	1,639	1,894	1,888	1,771	0,115
OURAL	1,392	1,532	1,605	1,536	1,533	1,519	0,078
SAGUNTO	1,629	1,745	1,647	1,554	1,581	1,631	0,074
SAN FELIU DE LLOBREGAT	1,555	1,537	1,537	1,507	0,354	1,298	0,528
SAN VICENC DEL HORTS	1,672	1,655	1,768	1,814	1,751(*)	1,727	0,076
SAN VICENTE DEL RASPEIG	1,620	1,599	1,625	1,568(*)	1,645(*)	1,615	0,014
TORAL DE LOS VADOS	1,595	1,515	1,527	1,365	1,500	1,501	0,084
TORREDONJIMENO	1,655	1,502	1,524	-	-	1,560	0,083
TUDELA VEGUIN	1,451	1,598	1,513	1,590	1,479	1,526	0,066
VALLCARCA	1,655	1,664	1,657	1,644	1,660	1,656	0,007
VILLALUENGA	1,626	1,728	1,877	1,726	1,807	1,753	0,095
YELES	1,587	1,784	1,839	1,744	1,777	1,746	0,095
Media total						1,582	

Tabla T4.10.- Relación crudo/clinker por fábrica y año, media y desviación estándar. Elaboración propia a partir de OFICEMEN (2012b). Notas: (i) la planta de Torredonjimeno dejó de operar en 2008; (ii) están marcadas con (*) las plantas en las que esta ratio o la presentada en la tabla T4.11 están fuera de sus límites teóricos.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Fábrica	Relación clinker/cemento						
	2006	2007	2008	2009	2010	Media	Desv.
A.G.BALBOA	0,875	0,747	0,822	0,783	0,823	0,810	0,084
ABOñO	0,610(*)	0,618(*)	0,559(*)	0,560(*)	0,704(*)	-	-
ALCALA DE GUADAIRA	0,747	0,797	0,784	0,735	0,955	0,804	0,029
ALCANAR	0,818	0,857	0,820	0,941	0,861	0,859	0,039
AÑORGA	0,850	0,868	0,417	0,364	0,524	0,604	0,056
ARRIGORRIAGA	0,695	0,721	0,674	0,725	0,771	0,717	0,003
BUñOL	0,752	0,792	0,728	0,775	1,370(*)	0,762	0,036
CARBONERAS	0,679	0,775	1,238(*)	0,742	1,056(*)	0,732	0,054
CASTILLEJO	0,811	0,799	0,800	0,797	0,313	0,704	0,022
CORDOBA	0,736(*)	0,726(*)	0,770(*)	0,772	0,965	0,869	0,018
GADOR	0,667	0,717	0,733	0,785	0,755	0,731	0,191
HONTORIA	0,721	0,706	0,719	0,728	0,852	0,745	0,122
JEREZ	0,705	0,706	0,739	0,793	0,759	0,741	0,139
LA ROBLA	0,730	0,810	0,892	1,262(*)	1,322(*)	0,811	0,039
LEMONA	0,796	0,778	0,608	0,494	0,502	0,636	0,057
LORCA	0,621	0,664	0,606	0,753	1,032(*)	0,661	0,174
LLOSETA	0,768	0,757	0,763	0,792	0,797	0,775	0,325
MALAGA	0,842	0,803	0,760	0,752	0,793	0,790	0,196
MATAPORQUERA	0,758	0,784	0,481	0,480	0,489	0,598	0,140
MONJOS	0,829	0,902	0,817	0,803	0,773	0,825	0,050
MONTCADA	0,795	0,807	0,778	0,687	0,877	0,789	0,072
MORATA DE JALON	0,743	0,808	0,774	0,784	0,737	0,769	0,028
MORATA DE TAJUÑA	0,767	0,761	0,704	0,799	0,832	0,773	0,026
NIEBLA	0,800(*)	0,818	0,839	0,828	1,209(*)	0,828	0,295
OLAZAGUTIA	0,761	0,747	0,833	0,734	0,810	0,777	0,115
OURAL	0,784	0,816	0,847	0,780	0,656	0,777	0,078
SAGUNTO	0,807	0,819	0,714	0,618	0,789	0,749	0,074
SAN FELIU DE LLOBREGAT	0,835	0,835	0,804	0,847	0,629	0,790	0,528
SAN VICENC DEL HORTS	0,873	0,749	0,853	0,854	1,102(*)	0,832	0,076
SAN VICENTE DEL RASPEIG	0,759	0,862	0,869	1,875(*)	1,919(*)	0,830	0,014
TORAL DE LOS VADOS	0,737	0,751	0,790	0,821	0,743	0,768	0,084
TORREDONJIMENO	0,805	0,854	0,673	-	-	0,777	0,083
TUDELA VEGUIN	0,782	0,793	0,751	0,783	0,831	0,788	0,066
VALLCARCA	0,845	0,832	0,773	0,807	0,764	0,804	0,007
VILLALUENGA	0,810	0,843	0,674	0,722	0,735	0,757	0,095
YELES	0,808	0,737	0,739	0,790	0,811	0,777	0,095
Media total						0,765	

Tabla T4.11.- Relación clinker/cemento por fábrica y año, media y desviación estándar. Elaboración propia a partir de OFICEMEN (2012b). Notas: (i) la planta de Torredonjimeno dejó de operar en 2008; (ii) están marcadas con (*) las plantas en las que esta ratio o la presentada en la tabla T4.10 están fuera de sus límites teóricos.

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

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

4.3 RESULTADOS

4.3.1.- Consumo de energía primaria

De la forma indicada en 4.2.2, se ha calculado la energía primaria consumida por cada fábrica para la producción de una tonelada (1 t) de clinker y de 1 t de cemento. Los resultados se presentan, respectivamente, en las tablas T4.12 y T4.13. Las figuras F4.2 y F4.3 presentan gráficamente los valores medios de cada fábrica para el periodo 2006-2010.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Fábrica	Energía / clinker (GJ/t)						
	2006	2007	2008	2009	2010	Media	Desv.
A.G.BALBOA	4,681	4,691	4,447	4,996	4,806	4,724	0,200
ABOñO	5,603(*)	5,294(*)	4,728(*)	4,154(*)	4,074(*)	-	-
ALCALA DE GUADAIRA	4,743	4,869	4,646	4,848	4,703	4,762	0,095
ALCANAR	4,425	4,698	5,072	4,239	4,537	4,594	0,315
AÑORGA	6,129	5,137	4,860	4,786	4,773	5,137	0,574
ARRIGORRIAGA	4,369	4,743	4,840	4,331	4,364	4,530	0,242
BUñOL	5,514	5,777	6,234	5,713	5,088(*)	5,810	0,304
CARBONERAS	5,775	5,255	5,343(*)	5,497	4,663(*)	5,509	0,260
CASTILLEJO	4,487	4,609	4,885	4,619	4,623	4,645	0,146
CORDOBA	3,916(*)	4,428(*)	5,862(*)	5,745	5,880	5,813	0,095
GADOR	5,203	5,753	4,999	4,663	5,508	5,225	0,426
HONTORIA	4,782	4,775	4,566	4,304	4,482	4,582	0,203
JEREZ	5,373	5,572	5,596	5,177	6,224	5,588	0,394
LA ROBLA	4,209	3,996	3,848	3,902(*)	3,830(*)	4,018	0,182
LEMONA	4,232	4,232	4,492	5,033	4,908	4,580	0,375
LORCA	5,724	5,636	5,598	6,021	6,368(*)	5,745	0,192
LLOSETA	4,923	5,232	5,878	4,876	5,029	5,188	0,409
MALAGA	4,878	4,965	5,074	4,499	4,419	4,767	0,291
MATAPORQUERA	4,383	4,485	4,402	4,381	4,212	4,373	0,099
MONJOS	4,673	4,445	4,867	4,873	5,015	4,775	0,221
MONTCADA	3,894	4,340	4,206	4,239	3,944	4,125	0,195
MORATA DE JALON	4,456	4,601	4,989	4,346	4,694	4,617	0,247
MORATA DE TAJUÑA	4,531	4,816	4,812	4,828	4,735	4,744	0,125
NIEBLA	5,307(*)	5,459	5,164	4,925	4,386(*)	5,183	0,268
OLAZAGUTIA	5,101	5,138	4,831	4,667	4,814	4,910	0,202
OURAL	4,322	4,515	4,411	4,411	4,301	4,392	0,085
SAGUNTO	5,485	5,591	4,874	4,788	4,671	5,082	0,424
SAN FELIU DE LLOBREGAT	5,030	4,953	5,853	5,444	9,201	6,096	1,773
SAN VICENC DEL HORTS	5,348	5,513	4,935	4,772	4,621(*)	5,142	0,346
SAN VICENTE DEL RASPEIG	5,325	5,125	4,764	3,646(*)	4,174(*)	5,071	0,284
TORAL DE LOS VADOS	4,403	4,572	4,461	4,277	4,361	4,415	0,111
TORREDONJIMENO	4,657	5,084	3,457	-	-	4,399	0,844
TUDELA VEGUIN	6,194	6,776	7,277	7,029(*)	7,002	6,812	0,460
VALLCARCA	4,611	4,706	5,060	4,887	4,986	4,850	0,188
VILLALUENGA	4,697	5,005	4,489	4,573	4,762	4,705	0,198
YELES	5,019	5,544	5,246	5,110	5,061	5,196	0,213
Media total						4,974	0,314

Tabla T4.12.- Consumo de energía primaria por tonelada de clinker por fábrica y año, media y desviación estándar. Elaboración propia a partir de OFICEMEN (2012b).

Notas: (i) la planta de Torredonjimeno dejó de operar en 2008;

(ii) están marcadas con (*) las plantas en alguna de las ratios presentadas en las tablas T4.10 y T4.11 están fuera de sus límites teóricos.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Fábrica	Energía / cemento (GJ/t)						
	2006	2007	2008	2009	2010	Media	Desv.
A.G.BALBOA	4,649	3,942	4,054	4,289	4,628	4,312	0,323
ABOÑO	4,213(*)	4,201(*)	3,286(*)	2,989(*)	3,400(*)	-	-
ALCALA DE GUADAIRA	4,186	4,594	4,129	4,012	4,940	4,372	0,386
ALCANAR	4,209	4,660	4,818	4,749	4,485	4,584	0,244
AÑORGA	5,861	5,074	2,555	2,200	2,928	3,724	1,636
ARRIGORRIAGA	3,922	4,302	3,886	3,605	3,806	3,904	0,254
BUÑOL	4,862	5,357	5,119	5,038	7,754(*)	5,094	0,206
CARBONERAS	4,386	4,598	7,462(*)	4,651	5,478(*)	4,545	0,140
CASTILLEJO	4,316	4,419	4,451	4,378	1,945	3,902	1,095
CORDOBA	3,796(*)	4,438(*)	5,204(*)	4,965	6,213	5,589	0,882
GADOR	3,948	4,492	4,143	4,096	4,514	4,239	0,252
HONTORIA	4,223	4,132	3,947	3,576	4,251	4,026	0,278
JEREZ	4,350	4,500	4,651	4,636	5,171	4,662	0,310
LA ROBLA	3,797	3,801	4,039	5,622(*)	5,673(*)	3,879	0,139
LEMONA	3,897	3,890	3,255	3,058	3,033	3,427	0,435
LORCA	4,124	4,240	3,807	5,357	7,330(*)	4,382	0,675
LLOSETA	4,275	4,550	5,008	4,415	4,502	4,550	0,276
MALAGA	5,082	4,763	4,364	3,836	3,905	4,390	0,538
MATAPORQUERA	4,002	4,386	2,753	2,516	2,467	3,225	0,902
MONJOS	4,528	4,769	4,557	4,432	4,319	4,521	0,167
MONTCADA	3,750	4,215	3,791	3,393	3,920	3,814	0,297
MORATA DE JALON	3,974	4,553	4,353	3,884	3,830	4,119	0,317
MORATA DE TAJUÑA	3,952	4,220	3,874	4,329	4,360	4,147	0,222
NIEBLA	5,114(*)	5,497	5,233	4,666	5,981(*)	5,132	0,424
OLAZAGUTIA	4,438	4,416	4,536	3,898	4,387	4,335	0,251
OURAL	3,873	4,215	4,285	3,985	3,273	3,926	0,402
SAGUNTO	5,295	5,381	4,086	3,678	4,396	4,567	0,749
SAN FELIU DE LLOBREGAT	4,822	4,767	5,388	5,902	4,857	5,147	0,490
SAN VICENC DEL HORTS	5,312	4,709	4,694	4,579	5,682(*)	4,824	0,331
SAN VICENTE DEL RASPEIG	4,618	5,186	4,725	8,397(*)	9,392(*)	4,843	0,302
TORAL DE LOS VADOS	3,773	4,008	4,075	4,028	3,637	3,904	0,190
TORREDONJIMENO	4,678	4,977	2,781	-	-	4,145	1,191
TUDELA VEGUIN	5,432	6,012	6,072	6,098(*)	6,533	6,012	0,451
VALLCARCA	4,745	4,858	4,564	4,521	4,378	4,613	0,189
VILLALUENGA	4,258	4,754	3,692	3,860	4,013	4,115	0,413
YELES	4,784	4,647	4,459	4,578	4,523	4,598	0,124
Media total						4,388	0,442

Tabla T4.13.- Consumo de energía primaria por tonelada de cemento por fábrica y año, media y desviación estándar.

Elaboración propia a partir de OFICEMEN (2012b).

Notas: (i) la planta de Torredonjimeno dejó de operar en 2008;

(ii) están marcadas con (*) las plantas en alguna de las ratios presentadas en las tablas 9 y 10 están fuera de sus límites teóricos.

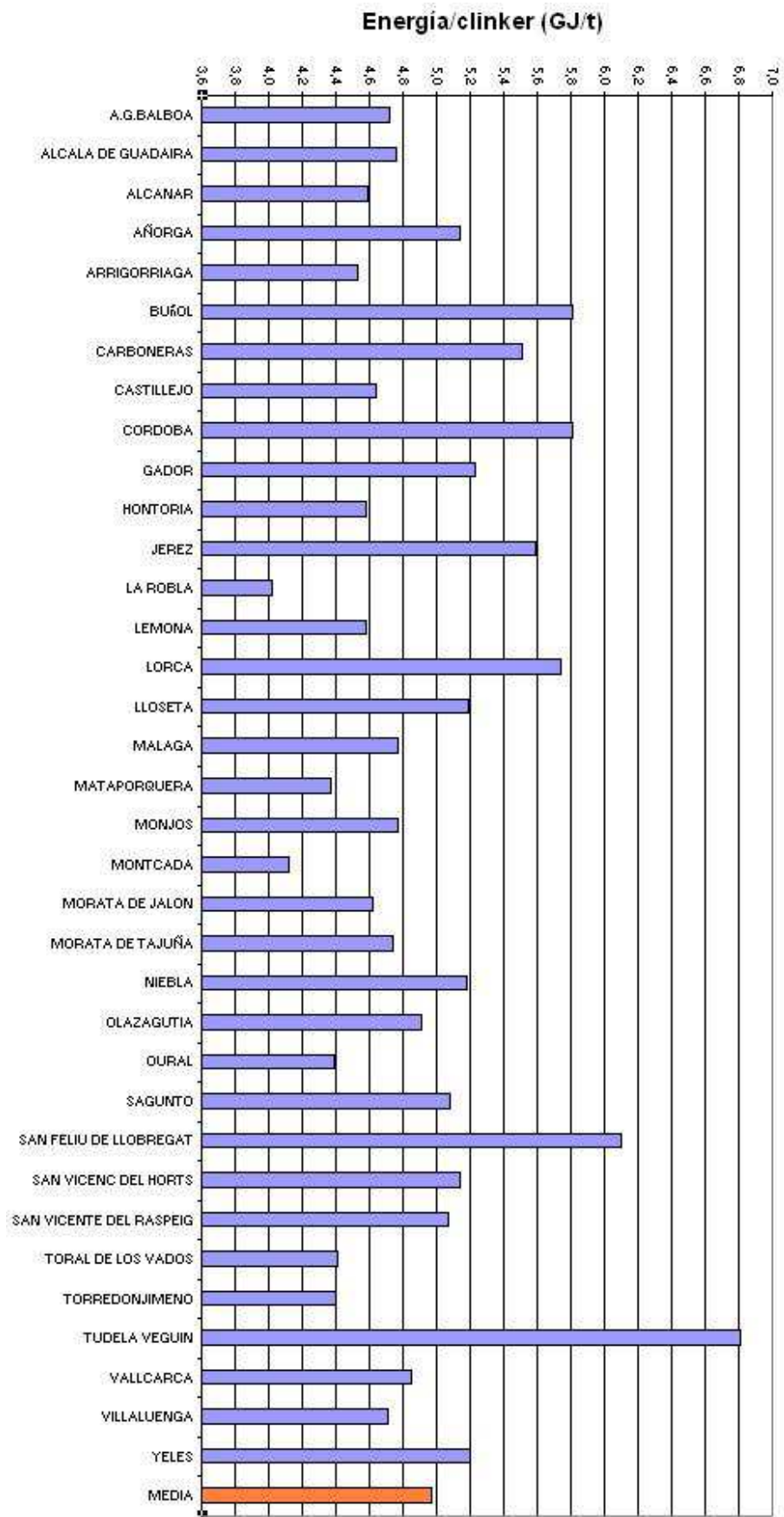


Figura F4.2.- Valor medio del consumo de energía primaria por tonelada de clinker por fábrica, para el periodo 2006-2010, a partir de los datos de la Tabla T4.12.

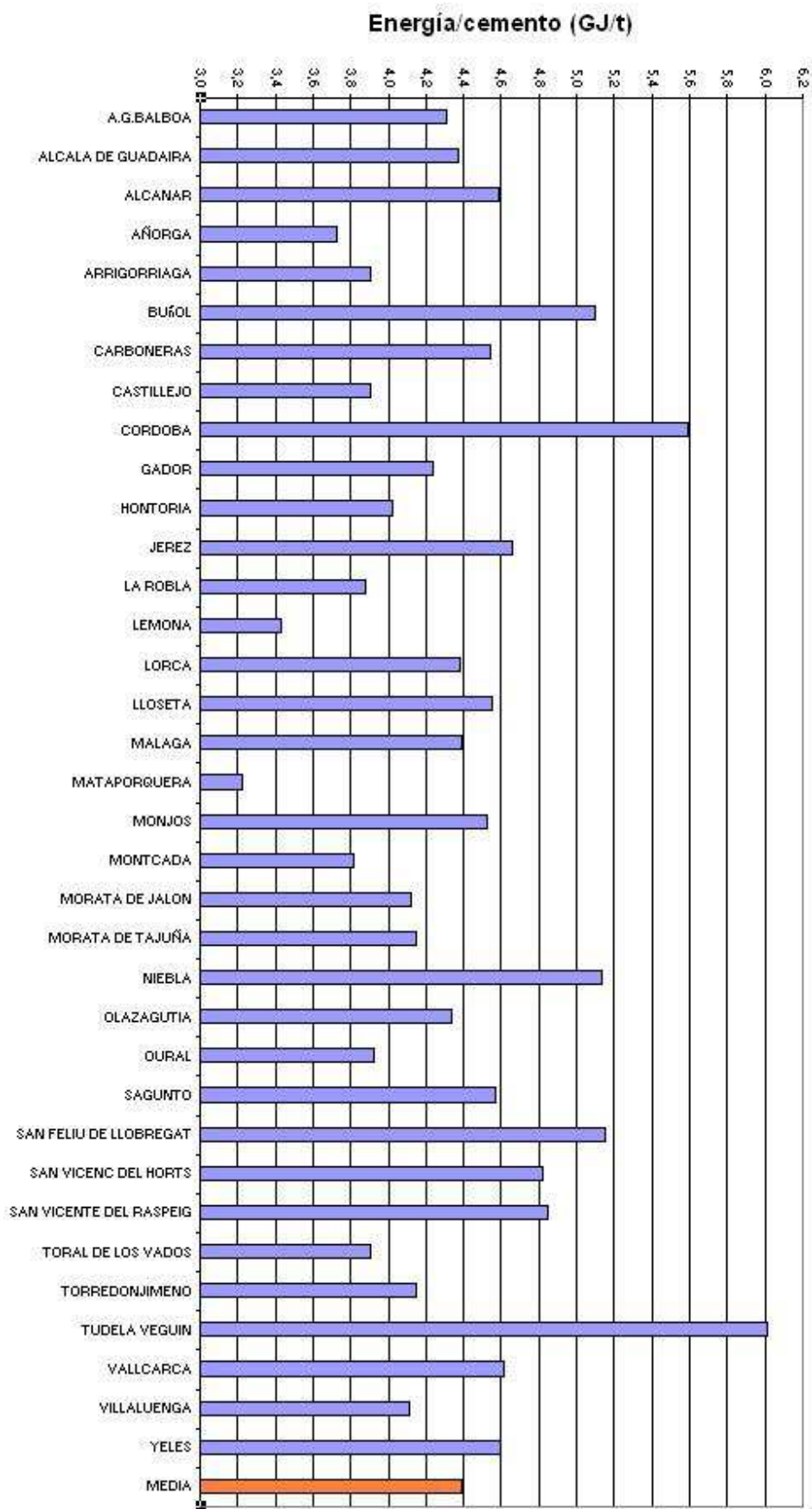


Figura 4.3.- Valor medio del consumo de energía primaria por tonelada de cemento por fábrica, para el periodo 2006-2010, a partir de los datos de la Tabla T4.13.

4.3.2.- Emisiones de dióxido de carbono

Análogamente, siguiendo lo dicho en 4.2.3 se han determinado las emisiones de CO₂ por tonelada de clinker y de cemento. Las tablas T4.14 y T4.15 y las figuras F4.4 y F4.5 recopilan los resultados obtenidos.

Fábrica	Emisiones / clinker (tCO ₂ /t)						
	2006	2007	2008	2009	2010	Media	Desv.
A.G.BALBOA	0,956	0,961	1,007	1,039	0,961	0,985	0,037
ABOÑO	1,009(*)	1,011(*)	0,998(*)	0,928(*)	0,915(*)	-	-
ALCALA DE GUADAIRA	0,966	0,968	0,974	0,987	0,977	0,974	0,008
ALCANAR	0,956	0,964	0,965	0,908	0,867	0,932	0,043
AÑORGA	1,085	0,988	0,984	0,984	0,975	1,003	0,046
ARRIGORRIAGA	0,931	0,954	0,954	0,945	0,944	0,945	0,009
BUÑOL	1,019	1,058	1,067	1,007	0,941(*)	1,038	0,029
CARBONERAS	0,902	0,948	0,956(*)	0,952	0,924(*)	0,934	0,028
CASTILLEJO	0,961	0,938	0,894	0,908	0,930	0,926	0,026
CORDOBA	0,965(*)	0,991(*)	1,041(*)	1,008	0,993	1,000	0,010
GADOR	1,009	1,020	0,989	0,977	0,986	0,996	0,018
HONTORIA	0,955	0,942	0,931	0,925	0,892	0,929	0,024
JEREZ	0,922	0,955	0,967	0,943	0,996	0,956	0,028
LA ROBLA	0,918	0,914	0,913	0,895(*)	0,846(*)	0,915	0,002
LEMONA	0,849	0,817	0,896	0,906	0,893	0,872	0,038
LORCA	0,977	0,999	1,010	1,054	1,097(*)	1,010	0,033
LLOSETA	0,981	0,978	0,983	0,921	0,917	0,956	0,034
MALAGA	1,008	1,017	1,034	0,960	0,936	0,991	0,041
MATAPORQUERA	0,962	0,967	0,907	0,953	0,926	0,943	0,025
MONJOS	0,950	0,964	0,993	0,989	1,008	0,981	0,023
MONTCADA	0,944	0,952	0,910	0,876	0,888	0,914	0,033
MORATA DE JALON	0,952	0,952	0,951	0,865	0,858	0,916	0,050
MORATA DE TAJUÑA	0,978	0,966	0,989	0,990	0,980	0,981	0,010
NIEBLA	1,063(*)	1,082	1,015	1,005	0,965(*)	1,034	0,042
OLAZAGUTIA	0,980	0,984	0,984	0,968	0,969	0,977	0,008
OURAL	0,933	0,960	0,969	0,947	0,946	0,951	0,014
SAGUNTO	1,007	1,089	0,956	0,943	0,939	0,987	0,063
SAN FELIU DE LLOBREGAT	1,007	1,005	1,018	1,024	1,228	1,057	0,096
SAN VICENC DEL HORTS	1,011	0,998	1,004	1,003	0,986(*)	1,004	0,005
SAN VICENTE DEL RASPEIG	1,031	0,999	0,932	0,826(*)	0,855(*)	0,987	0,050
TORAL DE LOS VADOS	0,939	0,971	0,974	0,947	0,952	0,957	0,015
TORREDONJIMENO	0,953	0,970	0,829	-	-	0,917	0,077
TUDELA VEGUIN	1,178	1,221	1,250	6,532(*)	1,226	1,219	0,030
VALLCARCA	0,982	0,991	0,990	0,891	0,966	0,964	0,042
VILLALUENGA	0,944	0,959	0,934	0,697	0,946	0,896	0,111
YELES	0,966	0,973	1,014	2,086	1,016	1,211	0,490
Media total						0,979	0,047

Tabla T4.14.- Emisión de CO₂ por tonelada de clinker, por fábrica y año, media y desviación estándar. Elaboración propia a partir de OFICEMEN (2012b).

Notas: (i) la planta de Torredonjimeno dejó de operar en 2008;

(ii) están marcadas con (*) las plantas en alguna de las ratios presentadas en las tablas T4.10 y T4.11 están fuera de sus límites teóricos.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Fábrica	Emisiones / cemento (tCO ₂ /t)						
	2006	2007	2008	2009	2010	Media	Desv.
A.G.BALBOA	0,863	0,742	0,850	0,833	0,831	0,824	0,047
ABOñO	0,652(*)	0,660(*)	0,591(*)	0,556(*)	0,669(*)	-	-
ALCALA DE GUADAIRA	0,752	0,803	0,789	0,750	0,956	0,810	0,085
ALCANAR	0,814	0,862	0,827	0,895	0,775	0,835	0,046
AÑORGA	0,949	0,892	0,439	0,383	0,532	0,639	0,263
ARRIGORRIAGA	0,688	0,728	0,674	0,710	0,751	0,710	0,030
BUñOL	0,794	0,865	0,808	0,811	1,328(*)	0,820	0,031
CARBONERAS	0,640	0,764	1,226(*)	0,738	1,004(*)	0,714	0,065
CASTILLEJO	0,812	0,787	0,745	0,761	0,316	0,684	0,207
CORDOBA	0,745(*)	0,753(*)	0,825(*)	0,807	0,986	0,897	0,127
GADOR	0,698	0,752	0,751	0,791	0,762	0,751	0,033
HONTORIA	0,724	0,702	0,702	0,698	0,783	0,722	0,036
JEREZ	0,682	0,707	0,743	0,777	0,779	0,738	0,043
LA ROBLA	0,710	0,772	0,848	1,168(*)	1,150(*)	0,777	0,070
LEMONA	0,705	0,671	0,573	0,479	0,478	0,581	0,105
LORCA	0,640	0,691	0,636	0,800	1,100(*)	0,692	0,076
LLOSETA	0,782	0,773	0,779	0,760	0,757	0,770	0,011
MALAGA	0,880	0,851	0,814	0,746	0,763	0,811	0,057
MATAPORQUERA	0,760	0,792	0,469	0,480	0,473	0,595	0,166
MONJOS	0,819	0,904	0,838	0,822	0,801	0,837	0,040
MONTCADA	0,779	0,800	0,735	0,628	0,805	0,749	0,073
MORATA DE JALON	0,738	0,806	0,762	0,704	0,652	0,732	0,058
MORATA DE TAJUÑA	0,777	0,766	0,723	0,816	0,836	0,783	0,044
NIEBLA	0,863(*)	0,880	0,876	0,861	1,199(*)	0,872	0,010
OLAZAGUTIA	0,776	0,767	0,848	0,736	0,809	0,787	0,043
OURAL	0,759	0,813	0,852	0,768	0,644	0,767	0,078
SAGUNTO	0,843	0,911	0,716	0,621	0,776	0,773	0,112
SAN FELIU DE LLOBREGAT	0,875	0,874	0,857	0,894	0,671	0,834	0,092
SAN VICENC DEL HORTS	0,910	0,776	0,882	0,883	1,117(*)	0,863	0,059
SAN VICENTE DEL RASPEIG	0,810	0,893	0,842	1,636(*)	1,716(*)	0,848	0,042
TORAL DE LOS VADOS	0,722	0,759	0,800	0,806	0,727	0,763	0,040
TORREDONJIMENO	0,806	0,861	0,583	-	-	0,750	0,148
TUDELA VEGUIN	0,953	1,003	0,972	5,143(*)	1,058	0,997	0,046
VALLCARCA	0,863	0,858	0,795	0,750	0,767	0,807	0,052
VILLALUENGA	0,791	0,838	0,662	0,541	0,719	0,710	0,116
YELES	0,814	0,748	0,777	1,677	0,844	0,972	0,396
Media total						0,778	0,084

Tabla T4.15.- Emisión de CO₂ por tonelada de cemento, por fábrica y año, media y desviación estándar. Elaboración propia a partir de OFICEMEN (2012b).

Notas: (i) la planta de Torredonjimeno dejó de operar en 2008;

(ii) están marcadas con (*) las plantas en alguna de las ratios presentadas en las tablas T4.10 y T4.11 están fuera de sus límites teóricos.

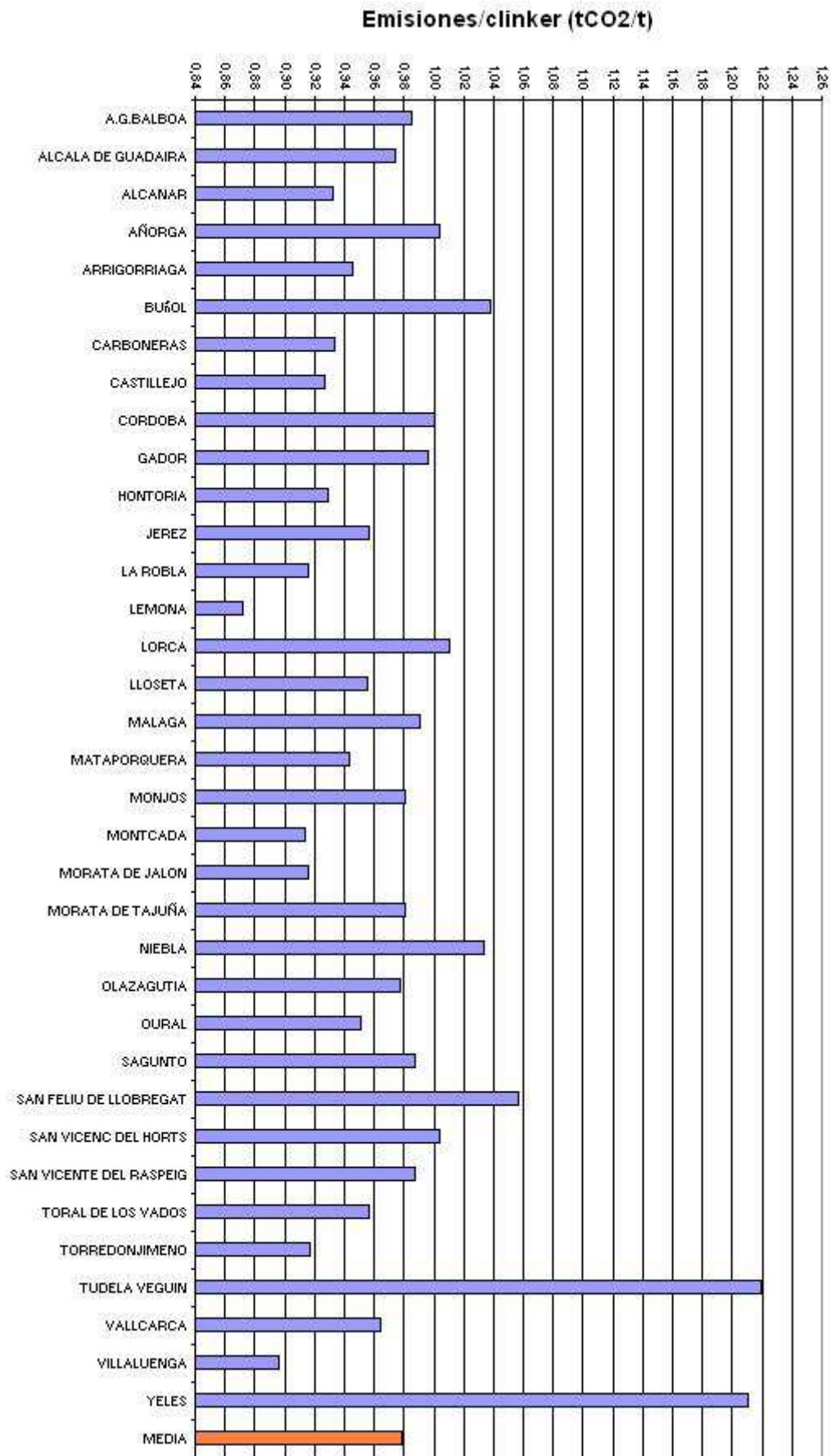


Figura F4.4.- Valor medio de las emisiones de CO₂ por tonelada de clinker por fábrica, para el periodo 2006-2010, a partir de los datos de la Tabla T4.14.

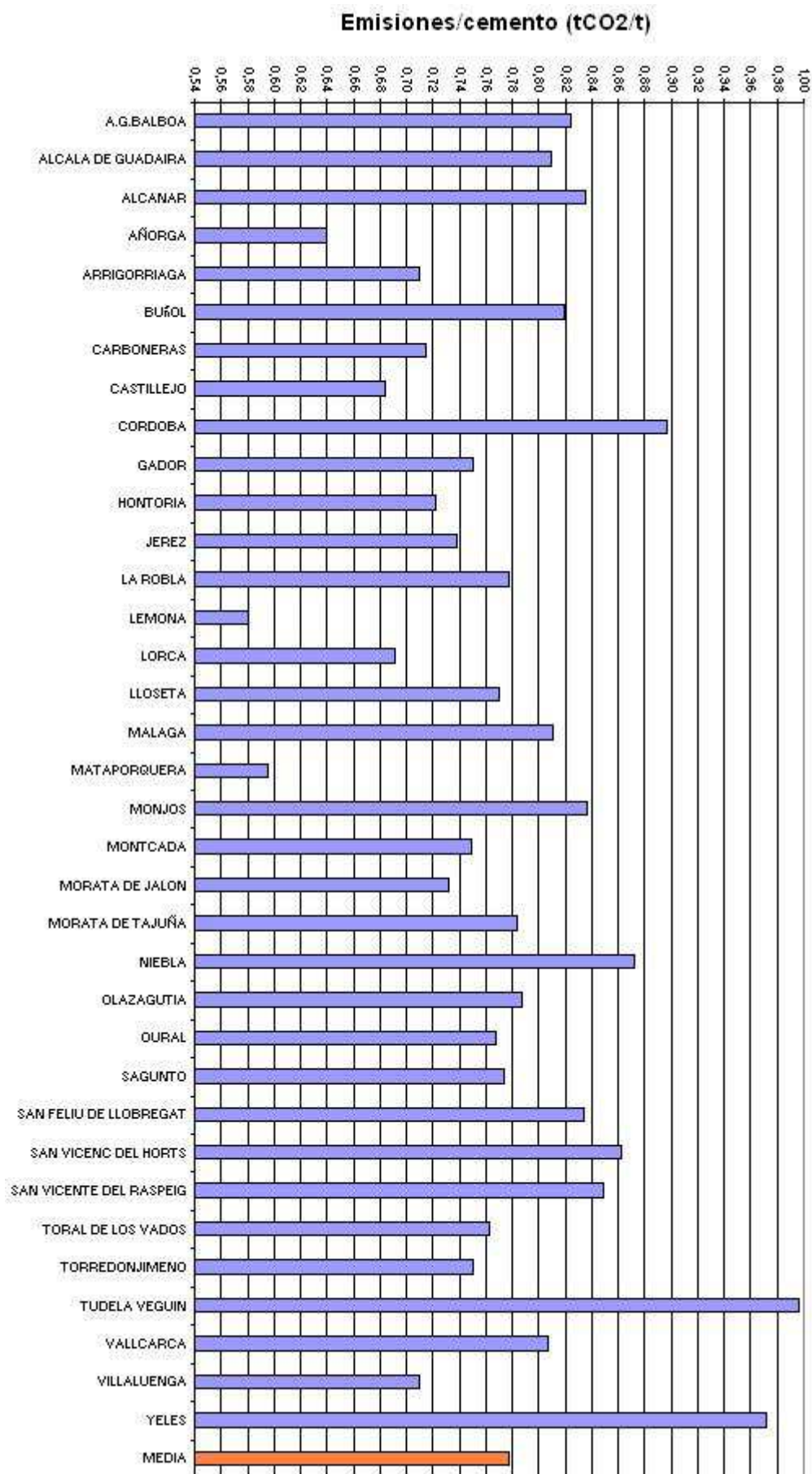


Figura F4.5.- Valor medio de las emisiones de CO₂ por tonelada de cemento por fábrica, para el periodo 2006-2010, a partir de los datos de la Tabla T4.15.

4.3.3.- Emisiones de otros contaminantes

Como se ha indicado anteriormente, la determinación de los factores de emisión de óxidos de nitrógeno y azufre, compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono y partículas en suspensión (NO_x, SO_x, VOC, CO y PM₁₀) se realiza a partir de valores medios tomados de la publicación EEA (2013). No tiene objeto, por tanto, particularizar el cálculo para cada fábrica, como en los casos anteriores, al no estar basado en registros reales de dichas instalaciones. Se ofrecen pues los resultados deducidos de aplicar las expresiones indicadas en 4.2.4, empleando los promedios de consumo eléctrico y transporte de materias primas por tonelada de cemento obtenidos del análisis de las 35 instalaciones industriales. Dado que en EEA (2013) se ofrecen tres valores (máximo, mínimo y medio) para cada parámetro, se manejan los tres para ofrecer, igualmente, un intervalo de resultados.

Concepto	Producción de cemento				
	NOx (g/t)	CO (g/t)	VOC (g/t)	SOx (g/t)	PM10 (g/t)
min	441,8	514,3	34,3	97,3	172,9
med	1402,4	1500,4	64,6	464,9	307,8
max	4816,6	4549,1	200,7	10715,1	564,0

Tabla T4.16.- Factores de emisión de otros contaminantes para la producción de cemento. Fuente: EEA (2013).

4.4 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se ha establecido una metodología del tipo ACV (análisis del ciclo de vida) para estimar el consumo de energía y las emisiones contaminantes en la fabricación del cemento. En base a ello, se ha propuesto un modelo para realizar dichas estimaciones. Además de la habitual revisión de la literatura existente, que no registraba estudios para España con el mismo alcance que aquí se ha empleado, se han recopilado datos de todas las plantas productoras ubicadas en España. Con todo ello se han realizado las correspondientes estimaciones, y los resultados obtenidos se resumen en las tablas T4.17 y T4.18 (véase el resto del capítulo para más detalle).

Los resultados de dichas tablas, junto con los oportunos resultados de los cálculos de los impactos del transporte que se realizan en el Anejo 3 de esta Tesis, han formado parte del estudio ambiental del ciclo de vida del hormigón que se ha abordado en el Capítulo 7.

A la vista de los resultados de este capítulo, puede comprobarse que se encuentran dentro del rango de valores ofrecidos habitualmente por la bibliografía especializada. Por su parte, la Tabla T4.19 recoge algunos valores medios de consumo energético y emisiones de CO₂ en la producción de cemento y clinker en diferentes zonas del planeta, tomadas de la literatura existente. En particular, Nisbet et al. (2010) reportan unos valores medios de 4,798 GJ/t y 0,927 tCO₂/t para el cemento fabricado en Estados Unidos, y Hammond y Jones (2011) han estimado valores de 4,510 GJ/t y 0,740 tCO₂/t para el cemento producido en el Reino Unido.

Valor	Energía (GJ/ t)	Emisión CO ₂ (t/t)	Emisión NO _x (g/t)	Emisión CO (g/t)	Emisión VOC (g/t)	Emisión SO _x (g/t)	Emisión PM ₁₀ (g/t)
Mínimo	4,018	0,872	330	460	2,3	20	142
Medio	4,974	0,979	1241	1455	18	374	284
Máximo	6,812	1,219	4670	4600	138	11120	568

Tabla T4.17.- Resumen de resultados. Rango de valores y valores medios de consumo de energía primaria y emisión de CO₂ para la producción de clinker en España, en 2006-2010.

Valor	Energía (GJ/ t)	Emisión CO ₂ (t/t)	Emisión NO _x (g/t)	Emisión CO (g/t)	Emisión VOC (g/t)	Emisión SO _x (g/t)	Emisión PM ₁₀ (g/t)
Mínimo	3,225	0,581	441,8	514,3	34,3	97,3	172,9
Medio	4,388	0,778	1402,4	1500,4	64,6	464,9	307,8
Máximo	6,012	0,997	4816,6	4549,1	200,7	10715,1	564,0

Tabla T4.18.- Resumen de resultados. Rango de valores y valores medios de consumo de energía primaria y emisión de CO₂ para la producción de cemento en España, en 2006-2010.

Concepto	E (GJ/t)	G (tCO ₂ /t)	Referencia
Cemento producido en la UE por vía seca con precalentamiento multietapa (sólo energía térmica, valores por tonelada de clinker)	3,00 – 4,00	-	Schorcht et al. (2013)
Cemento producido en la UE por vía seca con precalentamiento ciclónico (sólo energía térmica, valores por tonelada de clinker)	3,10 – 4,20	-	
Cemento producido en la UE por vía semi-seca (sólo energía térmica, valores por tonelada de clinker)	3,30– 5,40	-	
Emisiones medias por tonelada de cemento producido en la UE	-	0,672	
Valores medios para el cemento producido en el Reino Unido	4,51	0,740	Hammond y Jones (2011)
CEM I producido en el Reino Unido (94% clinker)	5,50	0,950	
Valores medios para el cemento producido en Nueva Zelanda	6,20	0,994	Alcorn (2003)
Cemento producido por vía seca en Nueva Zelanda	5,80	0,967	
Cemento producido por vía húmeda en Nueva Zelanda	6,50	1,021	
Emisiones medias del cemento producido en Australia		0,700 – 1,000	Flower y Sanjayan (2007)
Cemento producido por vía seca en Estados Unidos	5,59	1,010	Nisbet et al. (2010)
Cemento producido por vía húmeda en Estados Unidos	6,40	1,100	
Cemento producido por vía seca con precalentador en Estados Unidos	4,36	0,852	
Cemento producido por vía seca con precalcinador en Estados Unidos	4,22	0,874	
Cemento medio producido en Estados Unidos	4,80	0,927	

Tabla T4.19.- Algunos valores medios de consumo energético y emisión de CO₂ en la producción de cemento y clinker recogidos en la literatura existente.

A la vista de los resultados que se resumen en las tablas T4.17 y T4.18, una primera conclusión tiene que ver con la valoración del desempeño ambiental de la industria cementera española, a nivel global, por comparación con otros valores de referencia (tomando como referencia dos publicaciones oficiales centradas en las Mejores Técnicas Disponibles (MTD), como son Schorcht et al. (2013), a nivel europeo, y Ministerio de Medio Ambiente (2004), a nivel nacional). Según estas referencias, el empleo de la mejor tecnología disponible permitiría alcanzar consumos térmicos en los hornos por debajo de 4,0 GJ por tonelada de clinker (entre 2,90 y 3,20 según el Ministerio de Medio Ambiente, y entre 3,00 y 4,00 según Schorcht et al.). En los años estudiados, los consumos de energía térmica por tonelada de clinker se mantienen, para el conjunto del sector en España, entre 3,90 y 4,10 GJ/t. Teniendo en cuenta que este dato agrega todas las plantas existentes, de diferentes capacidades, tecnologías y antigüedades, puede afirmarse que el sector español del cemento está en la línea de

alcanzar las mayores eficiencias posibles en la actualidad. Previsiblemente, la evolución futura del sector ofrecerá indicadores todavía más cercanos a los valores asociados a las MTD, a medida que las instalaciones más antiguas o menos eficientes se vayan modernizando. Conclusiones muy similares se pueden obtener si se comparan las emisiones de dióxido de carbono por tonelada de cemento producido, que en España se encuentran entre 0,581 y 0,997 t (véase la Tabla 1), con los valores de referencia de Scorcht et al. (0,672 t) y del Ministerio de Medio Ambiente (0,700 t).

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

Por plantas, las figuras F4.2 a F4.5 muestran que existen ciertas diferencias entre unas y otras. La planta de Tudela-Veguín es la que presenta mayores valores de consumo energético y emisión de CO₂ por tonelada producida. Esta planta es la de menor capacidad de las que operan en este momento en nuestro país; únicamente cuenta con un horno para clinker blanco, con una capacidad máxima de 400 t/día. También la planta de Córdoba (Grupo Cimpor) registra valores elevados, si bien esta planta es una de las que presentan anomalías en la coherencia de sus datos estadísticos, y por ello puede no ser correcta su comparación. La planta de Yeles (Holcim España) tiene un tamaño medio (1.900 t/día) y destaca en cuanto a lo elevado de sus emisiones.

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

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

Los resultados de consumo energético y emisiones de CO₂ y de otros contaminantes, agrupados en las tablas T4.17 y T4.18, han permitido el desarrollo del análisis de ciclo de vida de una estructura de hormigón que se expone en el capítulo 7, así como el estudio crítico del Anejo 13 de la EHE-08, resumido en el capítulo 9, estableciendo la mayor o menor importancia relativa de las diferentes variables ambientales.

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES. PARTE II: EL ACERO

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES. PARTE II: EL ACERO

5.1 INTRODUCCIÓN

Continuando el tipo de análisis de consumo energético y emisiones contaminantes iniciado en el anterior capítulo, se procede ahora a estudiar desde este punto de vista el proceso de fabricación de armaduras de acero.

Existen en la literatura científica diversas publicaciones que analizan el perfil ambiental del acero, tanto el procedente de siderurgia integral como de acerías eléctricas. La Tabla T5.1 recoge aportaciones de diferentes fuentes e inventarios ambientales de productos de construcción, realizadas por Hammond y Jones (2011), Yellishetty et al. (2011), Dimoudi y Tompa (2008), Alcorn (2003), Burchart-Korol (2013), Sakamoto et al. (1999), y Hu et al. (2006). Los datos ofrecidos proceden, en el caso de las tres primeras publicaciones, de la World Steel Association; los restantes datos corresponden a análisis efectuados, respectivamente, en Nueva Zelanda, Polonia, Japón y China. La Tabla T5.1 incluye también datos de varios Análisis de Ciclo de Vida realizados en Europa para plantas EAF, en Italia, Suecia, Noruega, Finlandia y Dinamarca, publicados como Declaraciones Ambientales de Producto por las fuentes que se indican en dicha tabla.

Dadas las especiales características del sector del acero, en el que existe una alta competitividad y en el cual se considera sensible una gran cantidad de información relativa a la producción, no ha sido posible efectuar un estudio basado en registros de plantas españolas en producción, similar al presentado en el capítulo anterior para la producción de cemento. El presente estudio sobre el acero se basa, por tanto, en el análisis comparativo de varias fuentes bibliográficas, así como en las conversaciones mantenidas con profesionales de la industria siderúrgica (MEGASA, 2013).

Los aspectos relacionados con el consumo de energía y las emisiones de CO₂ abordados en este capítulo, que constituyen los aspectos más importantes, han sido publicados en un congreso internacional (Mel et al., 2014c).

5.2 METODOLOGÍA

5.2.1.- Consumo energético y emisiones de CO₂

A diferencia de lo que ocurre con el sector del cemento, para la producción de acero no existen recopilaciones estadísticas de acceso público en las que se detallan los consumos energéticos y de materias primas de las diferentes plantas de producción, así como el tipo y volumen de producción de cada una de ellas; existen en la Red estadísticas de la Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID, 2015), pero son de carácter general para el conjunto del sector. Los expertos del sector a los que se ha consultado indican que el del acero es un sector muy competitivo, en el que cualquier información relativa al proceso puede tener carácter sensible. Esta opacidad ha impedido el desarrollo de un análisis detallado, como el que se ha hecho para las fábricas de cemento.

Ante la ausencia de datos detallados se ha optado por realizar una revisión de la literatura existente sobre el consumo de energía primaria y la emisión de CO₂ en la producción de acero. Dado que se ha podido confirmar con fuentes del sector que la práctica totalidad del acero empleado en España para la producción de armaduras corrugadas procede de acerías del tipo EAF, la revisión bibliográfica se ha orientado principalmente en este sentido. Se han consultado bases de datos ambientales, publicaciones relacionadas con análisis de ciclo de vida, y certificados ambientales de productos.

Por otra parte, se ha estimado el impacto del transporte del acero desde sus puntos de origen (las plantas siderúrgicas) hasta sus destinos finales, empleando los factores de energía y emisión por tonelada y kilómetro aportados por las referencias Pérez y Monzón (2008) y Eriksson et al. (1996). Las distancias de transporte que se consideran, tanto para la vía marítima como para la terrestre, proceden también de estimaciones efectuadas a partir de las entrevistas mantenidas con profesionales del sector del acero. Los resultados que se incluyen en este capítulo no proceden de un registro estadístico, y suponen una limitación del modelo generado. Aun así, se considera que pueden representar de una forma aceptable el comportamiento del sector en España. Los cálculos completos relativos al impacto del transporte se incluyen en el Anejo 3.

5.2.2.- Emisión de otros contaminantes

Al igual que en el capítulo anterior, dedicado a la fabricación de cemento, se parte de los factores de emisión de NO_x, SO_x, CO, VOC y PM₁₀ reseñados en EEA (2013), como emisiones directas para la fabricación de acero en plantas EAF. A estos valores es necesario añadir, por un lado, las emisiones indirectas debidas al consumo eléctrico, en base a un consumo eléctrico medio por tonelada de 576 kWh, tomado de Remus et al. (2013). Por otro lado, hay que añadir también las emisiones indirectas debidas al transporte, asumiendo un transporte de materias primas de 5.000 km por vía marítima y 50 km por carretera.

5.3 RESULTADOS

5.3.1.- Energía y emisiones en la producción de acero

En Remus et al. (2013) se incluye un rango de valores de consumo energético y emisiones para las plantas EAF europeas, procedentes de un estudio realizado en 2004 sobre instalaciones de 11 países. El rango de energías que se indica es de 14,54 a 26,93 MJ/t de origen eléctrico y 0,05 a 15 MJ/t provenientes de combustibles. Por otra parte, las emisiones de CO₂ se estiman entre 0,072 y 0,180 kgCO₂/kg. Es posible que las discrepancias entre estos valores y los registrados por la mayoría de la bibliografía consultada se deban a que en realidad los datos, según se indica en el propio documento, no proceden de un análisis de ciclo de vida completo, sino que están elaborados a partir de las entradas / salidas de las fábricas estudiadas. De esta forma las emisiones reseñadas se corresponderían con las emisiones directas de las plantas, pero no tendrían en cuenta importantes focos de emisiones “aguas arriba”, como las procedentes de la generación eléctrica. Por este motivo, no se tendrán en cuenta estos valores a la hora de establecer los rangos de resultados.

En la Tabla T5.1, ya aludida, se recopilan los valores de energía y emisión de CO₂ por kg de acero, tomados de diferentes fuentes bibliográficas. Se incluyen varios datos relativos a acero primario, de modo ilustrativo, aunque se considerará que todo el acero corrugado empleado en España proviene del reciclaje de chatarra, tal como ya se ha anticipado.

Junto a cada entrada de la Tabla T5.1 se incluye la información relativa a las características del estudio que proporciona la referencia original. En la mayoría de los casos se trata de análisis de “cuna a puerta” (*cradle to gate*), en los que la frontera final del sistema se encuentra en la salida del material de la fábrica. Una vez que los productos de acero (redondos corrugados, alambres, mallas electrosoldadas) salen de la planta de producción, éstos deben de ser transportados hasta las plantas de ferralla, en las que se cortan y preparan para conformar las armaduras requeridas en cada proyecto. Las armaduras vuelven a ser transportadas hasta su destino final en la obra. El impacto ambiental de los transportes será tenido en cuenta aparte. En lo referente a los consumos imputables al corte, doblado y manipulación del acero en la ferralla, éstos serán estimados como un pequeño porcentaje de los valores correspondientes a la producción del material, ante la falta de datos.

Varios de los datos de la Tabla T5.1 proceden de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD, en sus siglas en inglés). Una EPD (ENVIRONDEC, 2013) es una declaración ambiental certificada, elaborada conforme a la norma ISO 14025:2006 (Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos; ISO, 2006). Estas certificaciones las emite un sistema internacional operado por el Swedish Environmental Management Council (SEMCo). Se han localizado EPD´s para varias plantas EAF italianas (Ferriera Valsabbia, 2011; Alfa Acciai, 2011; Acciaria di Sicilia, 2011; Feralpi, 2011; IRO, 2011) y para las fábricas que la empresa española CELSA posee en el norte de Europa (Celsa, 2012; 2012b; 2012c; 2012d).

Se observa que los datos procedentes de las fábricas italianas son muy similares entre sí, como también lo son los procedentes de las plantas de CELSA. Sin embargo, ambos grupos son diferentes entre sí, situándose respectivamente por encima de los máximos y por debajo de los mínimos indicados en Yellishetty et al. (2011). La explicación puede buscarse en la elevada importancia de la energía eléctrica dentro del acero EAF y las diferencias en los sistemas de generación de ambas regiones. Mientras que las plantas italianas indican que únicamente un 5-6% de su energía proviene

de fuentes renovables, en las plantas danesas se alcanza el 40% de energía renovable y en las suecas el 48%.

España se encuentra en un punto intermedio entre las situaciones anteriores. En el Anejo 1 (Mel et al. 2013) se han determinado los factores de emisión y consumo de energía primaria asociados a la generación eléctrica en nuestro país, obteniéndose que en 2010 las fuentes renovables supusieron en torno a un 22% de la energía primaria de origen eléctrico. Considerando que los valores más elevados para acero reciclado, de los consignados en la Tabla T5.1, son los correspondientes a la plantas de AcciAire di Sicilia y al análisis de ciclo de vida efectuado en instalaciones polacas (13,63 MJ/kg y 0,913 kgCO₂/kg, respectivamente) y los más bajos los correspondientes a Celsa Steel Service AS (6,64 MJ/kg, 0,340 kgCO₂/kg), se propone como valor más probable para el acero corrugado español la media de los anteriores, situada en el entorno de lo que las referencias Yellishetty et al. (2011) y Hammond y Jones (2011) proponen como valores medios. Estos resultados se resumen en la Tabla T5.2, acompañados de la estimación de emisiones de otros contaminantes realizada de acuerdo con lo dicho en el epígrafe 5.2.2.

Tipo de Acero	Energía (MJ/kg)	Emisiones (kgCO ₂ /kg)	Fuente	Tipo de análisis
Acero general (típico mundial, 61% primario – 39% reciclado)	25,30	1,950	Hammond y Jones (2011)	Análisis de “cuna a puerta” (cradle to gate) basado en datos internacionales de la World Steel Association..
Acero general 100% primario	35,4	2,890		
Acero general 100% reciclado	9,40	0,470		
Acero reciclado en barras	8,80	0,45		
Acero primario BOF	19,80 – 31,20	-	Yellishetty et al. (2011)	Información procedente directamente de World Steel Association (2010).
Acero primario DRI+EAF	28,30 – 30,90	-		
Acero reciclado EAF	9,10 – 12,50	-		
Acero para armaduras, reciclado	9,9	0,474	Dimoudi y Tompa (2008)	Información recopilada en 2001, procedente de referencias internacionales.
Acero primario	31,3	1,242	Alcorn (2003)	Análisis híbrido (procesos / entradas y salidas) “cuna a puerta” realizado en Nueva Zelanda en 2003.
Acero reciclado	8,6	0,352		
Acero primario BOF	35,43	2,459	Burchart-Korol (2013)	Análisis de ciclo de vida según ISO 14040 realizado en Polonia (7 plantas EAF y 1 planta integral), en 2010 y 2011.
Acero reciclado EAF	8,07	0,913		
Acero primario BOF	25	2,15	Sakamoto et al. (1999)	Análisis por procesos realizado en Japón.
Acero reciclado EAF	9,4	0,56		
Acero primario BOF	25,50	1,97	Hu et al., 2006	Estudio llevado a cabo en China en 2006.
Acero reciclado EAF	11,20	0,59		
Acero EAF corrugado Ferriera Valsabbia	11,65	0,689	Ferriera Valsabbia (2011)	Datos procedentes de EPD 2011 (Italia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Alfa Acciai	13,06	0,754	Alfa Acciai (2011)	Datos procedentes de EPD 2011 (Italia). Análisis “cuna a puerta”.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Acero EAF corrugado AcciAirie di Sicilia	13,63	0,780	AcciAirie di Sicilia (2011)	Datos procedentes de EPD 2011 (Italia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Feralpi Siderurgica	12,799	0,762	Feralpi (2011)	Datos procedentes de EPD 2011 (Italia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado I.R. Odolesi	13,60	0,802	IRO (2011)	Datos procedentes de EPD 2011 (Italia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Celsa Steel Service AB	7,91	0,360	Celsa (2012a)	Datos procedentes de EPD 2011 (Suecia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Celsa Steel Service AS	6,64	0,340	Celsa (2012b)	Datos procedentes de EPD 2011 (Noruega). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Celsa Steel Service OY	7,24	0,390	Celsa (2012c)	Datos procedentes de EPD 2011 (Finlandia). Análisis “cuna a puerta”.
Acero EAF corrugado Celsa Steel Service A/S	7,48	0,430	Celsa (2012d)	Datos procedentes de EPD 2011 (Dinamarca). Análisis “cuna a puerta”.

Tabla T5.1.- Consumo de energía primaria y emisión de CO₂ por kg de acero producido, según varias referencias bibliográficas.

Valor	Energía (MJ/kg)	CO ₂ (kg/kg)	NO _x (g/kg)	CO (g/kg)	VOC (g/kg)	SO _x (g/kg)	PM ₁₀ (g/kg)
Mínimo	6,64	0,340	0,862	0,406	0,180	0,409	0,085
Medio	10,14	0,623	1,009	0,538	0,269	0,608	0,139
Máximo	13,63	0,913	1,156	0,672	0,413	0,841	0,766

Tabla T5.2.- Rango de consumos de energía primaria y emisiones contaminantes por cantidad de acero producido.

5.3.2.- Energía y emisiones en la preparación de ferralla

La energía suplementaria que es necesario invertir (y sus emisiones correspondientes) para realizar los procesos de preparación de las armaduras, fuera ya de la planta siderúrgica, es atribuible a maquinaria de taller o a equipos móviles (cortadoras y dobladoras, soldadura, etc.) y se estima que puede tener un valor muy inferior a los atribuidos a la producción del acero. A falta de datos sobre los que trabajar, se estima un 3% de los valores anteriores. Los resultados se agrupan en la Tabla T5.3.

Valor	Energía (MJ/kg)	CO ₂ (kg/kg)	NO _x (g/kg)	CO (g/kg)	VOC (g/kg)	SO _x (g/kg)	PM ₁₀ (g/kg)
Mínimo	0,20	0,010	0,026	0,012	0,005	0,012	0,003
Medio	0,30	0,019	0,030	0,016	0,008	0,018	0,004
Máximo	0,40	0,027	0,035	0,020	0,012	0,025	0,023

Tabla T5.3.- Rango estimado de consumos de energía primaria y emisiones contaminantes en la preparación de armaduras (ferralla).

5.3.3.- Energía y emisiones en el transporte del acero

El último aspecto por estudiar es el transporte del acero, que se divide en dos etapas: de la planta siderúrgica a la planta de ferralla, y de la planta de ferralla a la ubicación de la obra. Según las fuentes del sector que se han consultado, la mayoría del acero corrugado empleado en España es de origen peninsular, no estando el mercado repartido en base a la ubicación geográfica de las fábricas. Existen tres productores de redondos corrugados (Arcelor-Mittal, Megasa Siderúrgica y Celsa), que sirven pedidos en toda la península. Para el transporte entre la siderúrgica y la planta de ferralla, en determinados casos se utiliza el transporte marítimo, aunque lo más habitual es el transporte por carretera. En el mercado interior las distancias máximas que recorren los camiones pueden estar en el orden de 1.200 km (dos días de viaje), mientras que lo más frecuente es realizar viajes de un día (hasta 600 km). Como valor mínimo se podría tomar el mercado local, con distancias del orden de 100 km, o menores. Es una práctica habitual que se procure que los viajes de vuelta de los camiones se hagan cargados con otra mercancía (por ejemplo, chatarra empleada como materia prima en las fábricas) para reducir los costes. Por este motivo, a efectos de cálculo sólo se debe tener en cuenta el viaje de ida.

El transporte entre la planta de ferralla y la obra sí se realiza íntegramente por carretera, siendo estas distancias mucho menores que las anteriores. Se pueden considerar unas distancias máxima y mínima, respectivamente, de 200 y 50 km. La distancia media se puede estimar en unos 100 km.

El impacto de estos transportes se puede evaluar empleando los factores de energía y emisiones propuestos por Pérez y Monzón (2008), de 1,4 MJ/t·km y 0,098 kgCO₂/t·km respectivamente para el transporte por carretera y 0,40 MJ/t·km y 0,0309 kgCO₂/t·km para el transporte marítimo entre puertos nacionales (cabotaje). Estos factores se deben incrementar en un 5% en el caso del transporte por carretera, según lo propuesto por Eriksson et al. (1996), para tener en cuenta las contribuciones de todas las etapas del ciclo de vida de los medios de transporte. Lo mismo se hace para el transporte marítimo, en este caso con un incremento del 1%. La estimación de las emisiones de NO_x, SO_x, VOC, CO y PM₁₀ se basó en datos de la referencia EEA (2013). Para evaluar la contribución del transporte marítimo en los recorridos entre la fábrica y la planta de ferralla, se puede suponer que los viajes de cortos se realizan exclusivamente por carretera, que a partir de los 600 km se pueden realizar un 20% en barco, y que en los de 1.200 km un 30% de los viajes se hacen en barco. En todo caso, en el Anejo 3 se han calculado los ratios de intensidad energética (en MJ/t·km), y de emisiones de contaminantes (kg/t·km o en g/t·km), tanto para el transporte por carretera como para el marítimo.

5.4 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han estimado los consumos de energía y las emisiones contaminantes en la fabricación de acero para su uso en hormigones estructurales. Los resultados son del mismo tipo que los del capítulo anterior, estimándose aquí los mismos parámetros que allí, si bien en base a información diferente, por no existir en el sector de la fabricación del acero estadísticas tan detalladas como las del sector cementero. Se ha consultado la literatura existente y las pocas estadísticas existentes sobre el sector español, y se han mantenido reuniones con expertos del sector. Los resultados obtenidos se resumen en las tablas T5.2 y T5.3 (véase el resto del capítulo para más detalle).

Al igual que en el capítulo anterior, los resultados de dichas tablas y los de los cálculos de los impactos del transporte (Anejo 3), han formado parte del estudio ambiental del ciclo de vida del hormigón que se ha abordado en el Capítulo 7.

Dichas tablas presentan rangos de valores de energía primaria y emisiones contaminantes por kilo de acero producido en plantas EAF, que pueden ser utilizados para modelar el comportamiento ambiental de los elementos estructurales que incorporan el acero como materia prima. Al no haber sido posible determinarlos a partir de parámetros reales de la industria española, se ha procedido a realizar una estimación indirecta, promediando los valores disponibles en países de nuestro entorno, asignados a instalaciones similares a las existentes en España. Esta limitación, ya expuesta anteriormente, hace necesario indicar que estos resultados se quedarían obsoletos en el momento en que trabajos posteriores permitiesen caracterizar la producción española de acero en base a datos reales de producción. Esto podría suceder si el sector del acero, como ha hecho el sector cementero a través de Oficemen, evolucionase para aportar a la sociedad este tipo de datos. Idénticas consideraciones son aplicables a los resultados referidos a la preparación de ferralla (Tabla T5.3) y a los procesos de transporte.

La importancia del suministro eléctrico, como principal fuente de energía del proceso de producción de acero reciclado, hace que los parámetros de emisión y consumo de energía primaria puedan variar notablemente entre un país y otro, aun cuando en ambos casos la tecnología de producción sea similar.

A modo de ejemplo, en Flower y Sanjayan (2007) se realiza un estudio de emisiones asociadas al sector del hormigón en Australia, concretamente en el estado de Melbourne. Se indica que el factor de emisión del sistema eléctrico considerado, para 2004-2005, es de valor 1,392 tCO₂/MWh. Este factor es más de 4 veces superior al calculado para España en 2010 (Mel et al., 2013). Esto se debe a la gran diferencia entre los “mix energéticos” español y australiano. En los años en que se realizó el estudio, más del 90% de la energía eléctrica australiana procedía de centrales térmicas de carbón, mientras que en España esta fuente supuso menos del 17% en 2010. Dentro de las referencias empleadas en el presente trabajo, y en particular con respecto a las EPDs aludidas en la última parte de la Tabla T5.1, se observa cómo la diferencia entre los niveles de emisiones de las plantas EAF italianas y las situadas en el norte de Europa reflejan los diferentes sistemas energéticos: predominio de las energías fósiles en Italia, frente a un porcentaje elevado de contribución de la energía hidroeléctrica en Suecia, Noruega, Finlandia y Dinamarca.

La ya mencionada ausencia de datos no ha permitido realizar un análisis en mayor profundidad de la producción de redondos corrugados en España. En este sentido, cobra importancia la existencia de

iniciativas como las declaraciones EPD, aunque por ahora son un número muy reducido de plantas las que disponen de ellas (ENVIRONDEC, 2013), o las declaraciones ambientales EMAS. Esta clase de certificaciones aumentan la transparencia de las instalaciones en términos ambientales, pudiendo ser un aspecto a valorar positivamente en procedimientos de evaluación de la sostenibilidad de los sistemas estructurales.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES. PARTE III: LOS ÁRIDOS

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES. PARTE III: LOS ÁRIDOS

6.1 INTRODUCCIÓN

Los áridos son el componente mayoritario del hormigón (del orden del 70-80% en peso, según la dosificación). Aunque su impacto ambiental es mucho menor que el del cemento, no puede despreciarse a la hora de estudiar el ciclo de vida del hormigón.

Se han consultado diversas publicaciones relacionadas con el impacto ambiental de productos y materiales de construcción, en las que se elaboraban inventarios dentro de los cuales se incluían áridos de diferentes tipos. Flower y Sanjayan (2007) estudian las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al sector del hormigón en Australia, e incluyen estimaciones para la producción de áridos graníticos y basálticos. En Nisbet et al. (2010) se realiza un estudio del sector del hormigón en Estados Unidos, mencionando también la producción de áridos en varias canteras. Finalmente, Alcorn (2003) y Hammond y Jones (2011) ofrecen inventarios ambientales de múltiples productos, referidos respectivamente a Nueva Zelanda y el Reino Unido.

Tras los estudios ambientales de la producción de cemento y acero presentados en los capítulos anteriores, se aborda a continuación el análisis de la producción de arenas y gravas. En este caso se trata de un estudio similar al realizado para las fábricas de cemento, tomando como base datos de producción y consumos correspondientes a un conjunto de canteras en explotación, pertenecientes a un grupo empresarial con implantación a nivel nacional. Por razones de confidencialidad no se reseñan la razón social de la empresa ni la ubicación de las canteras. Al igual que en los casos anteriores, han resultado de gran ayuda las conversaciones mantenidas con un profesional de este sector (Comunicación personal, 2014).

Los aspectos relacionados con el consumo de energía y las emisiones de CO₂ abordados en este capítulo, que constituyen los aspectos más importantes, han sido publicados en un congreso internacional (Mel et al., 2014b).

6.2 METODOLOGÍA

6.2.1.- Planteamiento general

Como se ha indicado, el presente capítulo aborda un análisis del consumo energético y las principales emisiones contaminantes asociadas a la extracción y tratamiento de áridos. Para ello se centra la atención en cuatro aspectos identificados como responsables de la mayor parte de estos consumos y emisiones:

- (i) El empleo de combustibles fósiles (gasóleo) en la maquinaria móvil de extracción y movimiento de tierras.
- (ii) El empleo de energía eléctrica en las instalaciones de transporte interno, trituración, clasificación y lavado.
- (iii) El empleo de explosivos para la realización de voladuras controladas.
- (iv) El ciclo de vida de los equipos e instalaciones de producción.

Se cuenta con los datos de producción y consumos de una decena de canteras situadas en la zona norte de España, pertenecientes a un mismo grupo empresarial, correspondientes a los años 2010 y 2011. Con ellos, y aplicando los esquemas de cálculo que se indicarán a continuación, se determinarán los parámetros de emisión y consumo por tonelada de material producido. Estos valores serán comparados con otros obtenidos en la bibliografía especializada.

La información disponible incluye, para cada una de las canteras, la cantidad total de gasóleo consumido por sus equipos móviles internos, la energía eléctrica consumida, la cantidad de material producido, y la de material triturado. Se entiende por material producido a todo el expedido por la cantera, mientras que el material triturado contabiliza aquel que ha pasado por la planta de molienda. Ambas cantidades pueden diferir debido a que (i) se puedan vender piezas pétreas de grandes dimensiones (por ejemplo para escolleras) o (ii) que no se llegue a expedir dentro del año considerado la totalidad del árido triturado.

Las voladuras con explosivos son realizadas por una subcontrata especializada, por lo que no se dispone de información relativa al consumo de explosivos. Como referencia para estimar este consumo se utiliza la información extraída de Cementos Portland Valderribas (2009; 2009b; 2010; 2010b; 2010c; 2010d; 2010e; 2010f), referida a canteras de caliza para la fabricación de cemento.

Al igual que en los capítulos anteriores, se complementan los resultados con una estimación de emisiones de NO_x, SO_x, VOC, CO y PM₁₀.

El análisis realizado tiene por límites la salida del material expedido por la cantera a sus clientes. La incidencia de los procesos de transporte de los áridos será estudiada al analizar el funcionamiento de una planta de hormigón preparado. La figura F6.1 representa un diagrama de flujo simplificado del proceso a estudiar, indicando las entradas, salidas y fronteras del mismo.

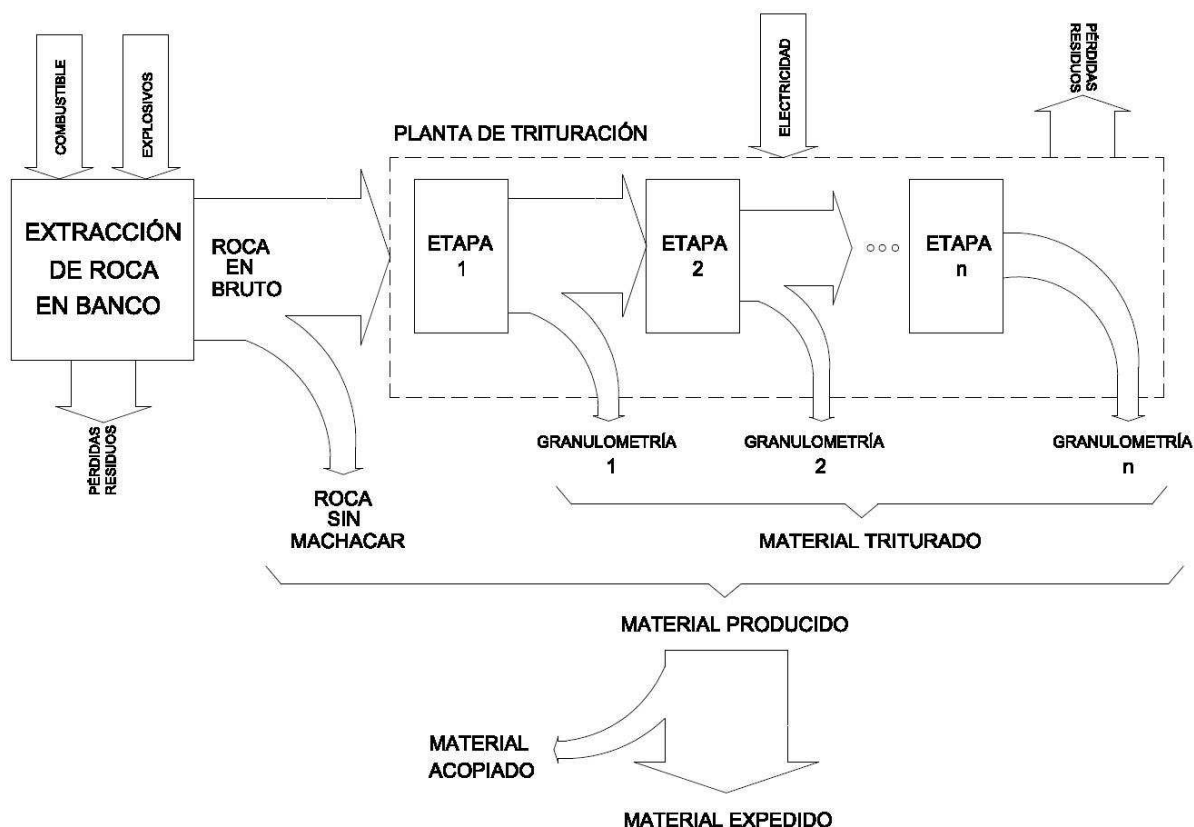


Figura F6.1.- Diagrama de flujo del proceso de producción de áridos en una cantera. Elaboración propia.

6.2.2.- Formulación para el cálculo energético

La energía consumida en la producción de árido se reparte entre la utilización de combustible (gasóleo) en los equipos móviles, la energía eléctrica para la planta de producción, la utilización de explosivos en las voladuras y el ciclo de vida de las instalaciones productivas. Se tiene también en cuenta la pequeña contribución del transporte de combustible y explosivo hasta la cantera.

El gasóleo y el explosivo intervienen en todo el material producido en la cantera (puesto que es necesario arrancarlo todo del banco), mientras que la energía eléctrica sólo incide sobre el material triturado (como el empleado para la producción de hormigón). Para reflejar adecuadamente esta situación en la determinación del consumo energético, se plantea el cálculo de la energía específica por unidad de masa de árido, del modo que se va a explicar a continuación. Por un lado dicha energía específica puede calcularse como:

$$E_{\text{específica árido}} = [(E_{\text{combustible}} + E_{\text{explosivos}} + E_{\text{transportes}}) / M_{\text{producido}}] + (E_{\text{electricidad}} / M_{\text{triturado}}) + E_{\text{CV}} \quad [E6.1]$$

Siendo $M_{\text{producido}}$ y $M_{\text{triturado}}$, respectivamente, las cantidades ya aludidas de material producido y triturado, y $E_{\text{combustible}}$ la energía consumida por causa del combustible (gasóleo) empleado en la cantera. Este valor puede calcularse como:

$$E_{\text{combustible}} = C_{\text{go}} \cdot \text{VCN}_{\text{go}} \cdot \text{FEP}_{\text{go}} \quad [E6.2]$$

Donde C_{go} es la cantidad, en toneladas, de gasóleo consumido, VCN_{go} el valor calorífico neto en MJ/t del gasóleo según Comisión Europea (2007), y FEP_{go} el factor de energía primaria del gasóleo, que

tiene en cuenta el coste energético de la extracción y procesado industrial de combustibles fósiles; se ha adoptado el valor de $FEP_{go} = 1,085$, de acuerdo con lo indicado por Furuholt (1995).

Por otro lado, $E_{explosivos}$ es, obviamente, la energía consumida por causa del uso de explosivos en la cantera, que puede calcularse como:

$$E_{explosivos} = M_{producido} \cdot FC_{explosivo} \cdot FE_{explosivo} = C_{exp} \cdot FE_{explosivo} \quad [E6.3]$$

Donde $M_{producido}$ es la cantidad total de material procesado (igual a la cantidad total de material extraída del banco), $FC_{explosivo}$ es el factor de consumo del explosivo, determinado a partir de la información aportada por Cementos Portland Valderribas (2009; 2009b; 2010; 2010b; 2010c; 2010d; 2010e; 2010f), y al que se ha dado un valor de $1,57 \cdot 10^{-4} t_{explosivo}/t_{material\ extraído}$. Finalmente, $FE_{explosivo}$ es el factor energético del explosivo, para el cual se ha tomado un valor de 4,80 MJ/kg, de acuerdo con Maxam (2013).

Por su parte, $E_{transportes}$ es la energía consumida en el transporte de gasóleo y explosivos, que puede calcularse como:

$$E_{transportes} = E_{t\ combustible} + E_{t\ explosivo} = (C_{go} \cdot D_{go} + C_{exp} \cdot D_{exp}) \cdot IE_t \quad [E6.4]$$

Donde C_{go} y C_{exp} son las cantidades transportadas de gasóleo y explosivo, respectivamente, y D_{go} y D_{exp} son las distancias de transporte por carretera correspondientes. En ambos casos se considera transporte por carretera; para el gasóleo su punto de origen es una refinería, desde la que se toma una distancia media de 300 km. En el caso del explosivo se supone una distancia media de 600 km. IE_t es la intensidad energética del transporte en camión, adoptándose el valor de 1,47 MJ/t-km procedente de Pérez y Monzón (2008), incrementado en un 5% para incluir el impacto del ciclo de vida de los vehículos, de acuerdo con lo ya indicado el Capítulo 4 (Eriksson et al., 1996); véase el Anejo 3 para más detalle sobre el cálculo de intensidades energéticas del transporte.

En otro orden de cosas $E_{electricidad}$ corresponde a la energía eléctrica consumida consumida por las instalaciones de trituración, que puede calcularse como:

$$E_{electricidad} = W \cdot FEP_e \quad [E6.5]$$

Donde W es la energía eléctrica consumida y FEP_e el factor de energía primaria asociado a la electricidad, determinado en el Anejo 2 (Mel et al., 2013), tomándose un $FEP_e = 6,20 \text{ GJ / MWhe}$.

Finalmente, el último sumando de la expresión [E6.1], E_{CV} , incluye los costes energéticos de construcción, mantenimiento y desmantelamiento de la planta y los equipos empleados en ella. A falta de datos que permitan una aproximación de mayor precisión, E_{CV} se ha calculado como:

$$E_{CV} = 0,05 \cdot [(E_{combustible} + E_{explosivo}) / M_{producido} + E_{electricidad} / M_{triturado}] \quad [E6.6]$$

En esta expresión no se incluye el transporte de combustibles y explosivos, dado que ya se contabiliza dentro de la intensidad energética que aparece en [E6.4].

La energía específica obtenida mediante [E6.1] es un valor medio para cualquier árido obtenido de una misma cantera, ya que durante el desarrollo metodológico anterior no se ha tenido en cuenta en

ningún momento las diferencias entre granulometrías de los diferentes materiales expedidos. En realidad la implicación energética de las fracciones finas (arenas) es mayor que la de las fracciones gruesas (gravas), debido al mayor nivel de molienda, que implica mayor número de etapas en la planta y un mayor consumo de energía eléctrica. A los efectos del presente estudio se considera que la aproximación realizada cuenta con la suficiente precisión, teniendo en cuenta que al hormigón se incorporan tanto áridos finos como gruesos.

A modo de resumen, se recogen en la Tabla T6.1 los diferentes parámetros de cálculo citados previamente, con alusión a la referencia de la que proceden.

CONCEPTO		REFERENCIA
Valor Calorífico Neto gasóleo (GJ/t)	43,00	Comisión Europea (2007)
Factor Energía Primaria gasóleo	1,085	Furuholt (1995)
Factor Energía Primaria energía eléctrica 2010 (GJ/MWhe)	6,20	Anejo 2 (Mel et al., 2013)
Consumo de explosivo ($t_{\text{explosivo}}/t_{\text{material extraído}}$)	0,000157	Cementos Portland Valderribas (2009a; 2009b; 2010; 2010b; 2010c; 2010d; 2010e; 2010f).
Factor energético explosivo (MJ/kg)	4,80	Maxam (2013)
Intensidad energética transporte en camión (MJ/t-km)	1,470	Pérez y Monzón (2008); Eriksson et al. (1996)
Distancia de transporte gasóleo (km)	300	-
Distancia de transporte explosivos (km)	500	-

Tabla T6.1.- Parámetros empleados en los cálculos energéticos.

6.2.3.- Formulación para el cálculo de las emisiones de CO₂

La determinación de las emisiones específicas de CO₂ que corresponden a la producción de áridos se lleva a cabo de un modo análogo al ya seguido en 6.2.2 para el estudio del consumo energético. Se detallan a continuación las expresiones y parámetros empleados, omitiendo la repetición de explicaciones ya incluidas en el apartado anterior. Por un lado, de forma paralela a [E6.1] y [E6.2]:

$$G_{\text{especifica árido}} = [(G_{\text{combustible}} + G_{\text{explosivo}} + G_{\text{transporte}}) / M_{\text{producido}}] + (G_{\text{electricidad}} / M_{\text{triturado}}) + G_{\text{CV}} \quad [\text{E6.7}]$$

$$G_{\text{combustible}} = C_{\text{go}} \cdot FG_{\text{go}} \cdot FG_{\text{Pgo}} \quad [\text{E6.8}]$$

Donde FG_{go} es el factor de emisión del gasóleo, de valor 3,182 tCO₂/t_{go} según Comisión Europea (2007), y FG_{Pgo} el factor de emisión asociado a la producción del gasóleo, que supone un 10% de las emisiones generadas durante el consumo del mismo, según Furuholt (1995). Por otro lado, de forma similar a [E6.3]:

$$G_{\text{explosivo}} = M_{\text{producido}} \cdot FC_{\text{explosivo}} \cdot FG_{\text{explosivo}} = C_{\text{exp}} \cdot FG_{\text{explosivo}} \quad [\text{E6.9}]$$

Donde $FG_{\text{explosivo}}$ es el factor de emisión de CO_2 del explosivo, adoptando un valor de 0,180 $tCO_2/t_{\text{explosivo}}$ según Flower y Sanjayan (2007). Por su parte, de la misma forma que [E6.4]:

$$G_{\text{transportes}} = G_{\text{t combustible}} + G_{\text{t explosivo}} = (C_{\text{go}} \cdot D_{\text{go}} + C_{\text{exp}} \cdot D_{\text{exp}}) \cdot IG_t \quad [E6.10]$$

Siendo IG_t el factor de emisión asociado al transporte por carretera, tomado de Pérez y Monzón (2008), adoptándose un valor base de 14,04 $gCO_2/t\cdot km$, e incrementándose dicho valor en un 5%, para tener en cuenta las emisiones durante el ciclo de vida de los vehículos, tal como se acaba de comentar más arriba. Para más detalle, véase el Anejo 3. En otro orden de cosas, de forma paralela a [E6.5]:

$$G_{\text{electricidad}} = W \cdot FG_e \quad [E6.11]$$

Donde FG_e es el factor de emisión del sistema eléctrico español, determinado en el Anejo 2 (Mel et al., (2013), habiéndose tomado un valor de 0,301 $tCO_2/MWhe$. Por último, de forma similar a [E6.6]:

$$G_{CV} = 0,05 \cdot [(G_{\text{combustible}} + G_{\text{explosivo}}) / M_{\text{producido}} + G_{\text{electricidad}} / M_{\text{triturado}}] \quad [E6.12]$$

Se resumen en la Tabla T6.2 los parámetros considerados en este apartado.

CONCEPTO		REFERENCIA
Factor de emisión del gasóleo ($tCO_2/t_{\text{gasóleo}}$)	3,182	Comisión Europea (2007)
Factor de emisión en la producción de gasóleo	1,10	Furuholt (1995)
Factor de emisión electricidad ($tCO_2/MWhe$)	0,301	Anejo 2 (Mel et al., 2013)
Factor emisiones explosivo (tCO_2/t)	0,180	Flower y Sanjayan (2007)
Factor emisión transporte en camión ($gCO_2/t\cdot km$)	96,9 (+ 5%)	Pérez y Monzón (2008) Eriksson et al. (1996)

Tabla T6.2.- Parámetros empleados en los cálculos de emisiones.

6.2.4.- Formulación para el cálculo de otros contaminantes

De forma análoga a lo explicado en 4.2.4, se complementa el análisis ambiental con una estimación de las emisiones de NO_x , SO_x , VOC, CO y PM_{10} , empleando los parámetros de emisión tomados de EEA (2013). Se contabilizan las emisiones debidas al consumo eléctrico, de acuerdo con los cálculos del Anejo 2, y las debidas al consumo de gasóleo, empleando directamente, para estas, los factores de emisión de EEA (2013). También se tienen en cuenta las emisiones de partículas especificadas en de EEA (2013) para extracción de roca en canteras, con valores mínimo, medio y máximo de 25, 50 y 100 g/t , respectivamente.

Designando por J_i la cantidad emitida del contaminante i , se establece la siguiente expresión, referida a la producción de árido:

$$J_i = J_{i \text{ combustible}} + J_{i \text{ electricidad}} + J_{i \text{ extracciónMMPP}} \quad [E6.13]$$

Cuyas variables son paralelas a las usadas en 4.2.4. Dividiendo las emisiones anuales así obtenidas entre la producción total de áridos, se obtiene la emisión específica de cada contaminante, $J_{\text{árido}}$:

$$J_{\text{árido}} = J_i / M_{\text{producido}} \quad [\text{E6.14}]$$

6.2.5.- Origen de los datos

Por razones de confidencialidad no se hace referencia en este documento a la empresa que ha suministrado la información sobre sus explotaciones ni a la localización de las mismas. Todas las canteras se sitúan en el noroeste peninsular, y en ellas se extraen materiales de origen granítico.

Los datos aportados por la empresa incluyen, para cada cantera, el consumo total de gasóleo (C_{go}), la energía eléctrica consumida (W), el material total producido ($M_{\text{producido}}$) y el material total triturado ($M_{\text{triturado}}$).

La Tabla T6.3 recopila la información de partida aportada. Cada instalación de producción se ha identificado a través de un código numérico. En algunas canteras no se encuentran disponibles algunos datos, lo que se indica como “n.d.”.

Cantera	Material producido (t)		Material triturado (t)		Consumo de gasóleo (L)		Consumo eléctrico (kWh)	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
1	214.098	250.578	182.960	181.737	83.986	98.774	425.226	n.d.
2	161.136	154.998	161.136	145.628	58.961	58.463	421.359	408.824
3	275.194	253.474	275.194	248.185	150.289	132.298	817.541	747.606
4	189.180	104.139	192.728	104.186	51.468	18.982,00	264.363	233.120
5	380.810	235.319	380.810	231.896	162.535	114.790	843.157	594.670
6	295.400	252.043	295.400	251.853	106.259	112.306	931.811	859.593
7	354.567	196.091	354.567	196.606	187.424	112.078	826.450	533.478
8	292.067	150.036	292.067	150.036	134.892	80.497	555.589	172.453
9	105.967	68.800	137.957	85.888	132.165	107.044	n.d.	n.d.
10	n.d.	305.115	n.d.	300.211	n.d.	103.801	n.d.	541.803

Tabla T6.3.- Datos de partida para el análisis de canteras.

6.3 RESULTADOS

6.3.1.- Consumo de energía primaria

De la forma indicada en 6.2.2, se ha calculado las energías primarias específicas asociadas a combustible, explosivo, transporte, electricidad y ciclo de vida de la instalación, por tonelada de material. Asimismo se obtiene la energía específica total, como sumatorio de los términos anteriores. Los resultados se presentan en la Tabla T6.4.

Cantera	E _{esp.comb.} (GJ/t)		E _{esp.expl.} (GJ/t)		E _{esp.transp.} (GJ/t)		E _{esp.elec.} (GJ/t)		E _{esp.CV} (GJ/t)		E _{esp. Total} (GJ/t)	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
1	0,0152	0,0153	0,000754	0,000754	0,000222	0,000223	0,0144	n.d	0,0015	0,0008	0,0321	n.d
2	0,0142	0,0146	0,000754	0,000754	0,000214	0,000218	0,0162	0,0174	0,0016	0,0016	0,0329	0,0347
3	0,0212	0,0203	0,000754	0,000754	0,000271	0,000263	0,0184	0,0187	0,0020	0,0020	0,0427	0,0419
4	0,0106	0,0071	0,000754	0,000754	0,000184	0,000156	0,0085	0,0139	0,0010	0,0011	0,0210	0,0229
5	0,0166	0,0189	0,000754	0,000754	0,000233	0,000252	0,0137	0,0159	0,0016	0,0018	0,0328	0,0376
6	0,0140	0,0173	0,000754	0,000754	0,000212	0,000239	0,0196	0,0212	0,0017	0,0020	0,0362	0,0414
7	0,0205	0,0222	0,000754	0,000754	0,000265	0,000279	0,0145	0,0168	0,0018	0,0020	0,0378	0,0420
8	0,0179	0,0208	0,000754	0,000754	0,000244	0,000268	0,0118	0,0071	0,0015	0,0014	0,0322	0,0304
9	0,0484	0,0604	0,000754	0,000754	0,000491	0,000588	n.d.	n.d.	0,0025	0,0031	n.d	n.d
10	n.d.	0,0132	n.d.	0,000754	n.d.	0,000206	n.d.	0,0112	n.d.	0,0013	n.d.	0,0266

Tabla T6.4.- Consumos de energía primaria parciales y total, por tonelada de árido producido. Elaboración propia.

Debe de señalarse que los resultados obtenidos son aplicables, en general, al árido que haya sido triturado, sin diferenciación por granulometría, dado que se incluye la energía eléctrica.

El consumo más bajo en 2010 corresponde a la cantera nº4 (0,021 GJ/t), mientras que el más alto es el de la nº3 (0,0427 GJ/t). En 2011 la nº4 vuelve a ser la instalación de menor consumo (0,023 GJ/t), y en este caso es la cantera nº7 la que ofrece un mayor valor (0,0421 GJ/t). El promedio para los valores obtenidos es de 0,0335 GJ/t en 2010 y 0,0347 GJ/t en 2011. La media total de todos los valores calculados es de 0,0341 GJ/t. Las figuras F6.2 y F6.3 presentan gráficamente los datos de las últimas columnas de la Tabla T6.4.

A la vista de los resultados obtenidos, para la energía primaria en producción de áridos graníticos se ha adoptado un rango de valores de 0,021 a 0,043 GJ/t, estimándose como valor más probable el de 0,034 GJ/t.

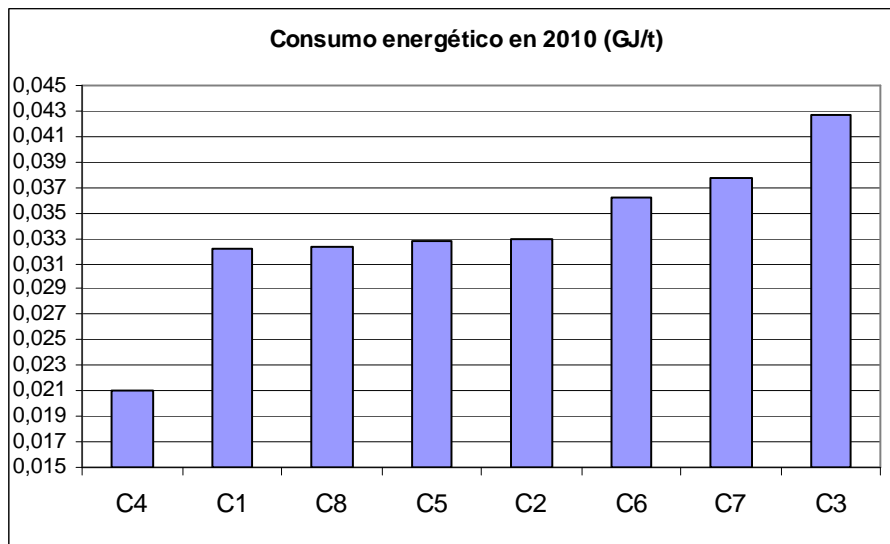


Figura F6.2.- Consumo de energía primaria en canteras graníticas (año 2010). Elaboración propia.

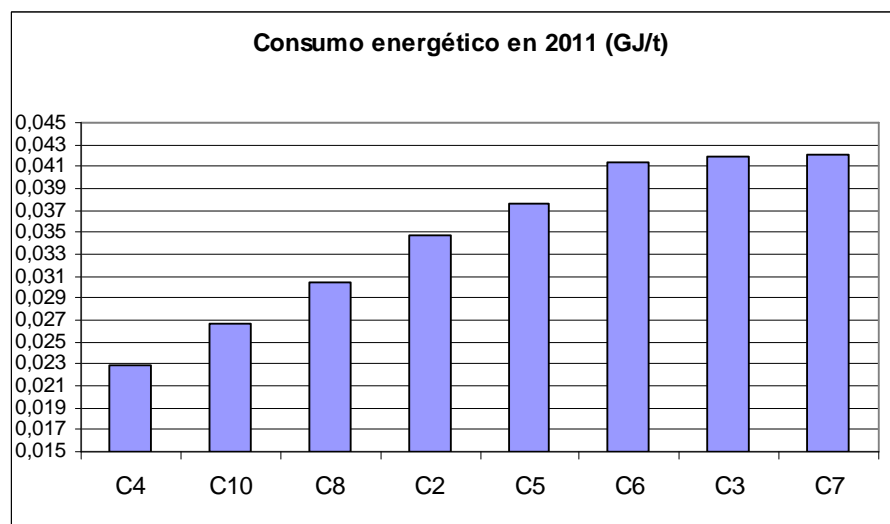


Figura F6.3.- Consumo de energía primaria en canteras graníticas (año 2011). Elaboración propia.

La Figura F6.4 muestra la contribución de cada uno de los aportes energéticos estudiados al consumo total de cada cantera. La tónica general es que el gasóleo y la electricidad suponen más del 90% del consumo energético de las canteras, repartido de una forma más o menos equitativa entre ambos, con una ligera preponderancia del gasóleo. Bajo las hipótesis asumidas para su estimación, la importancia de los explosivos es pequeña, y la del transporte a cantera de explosivos y combustible es despreciable.

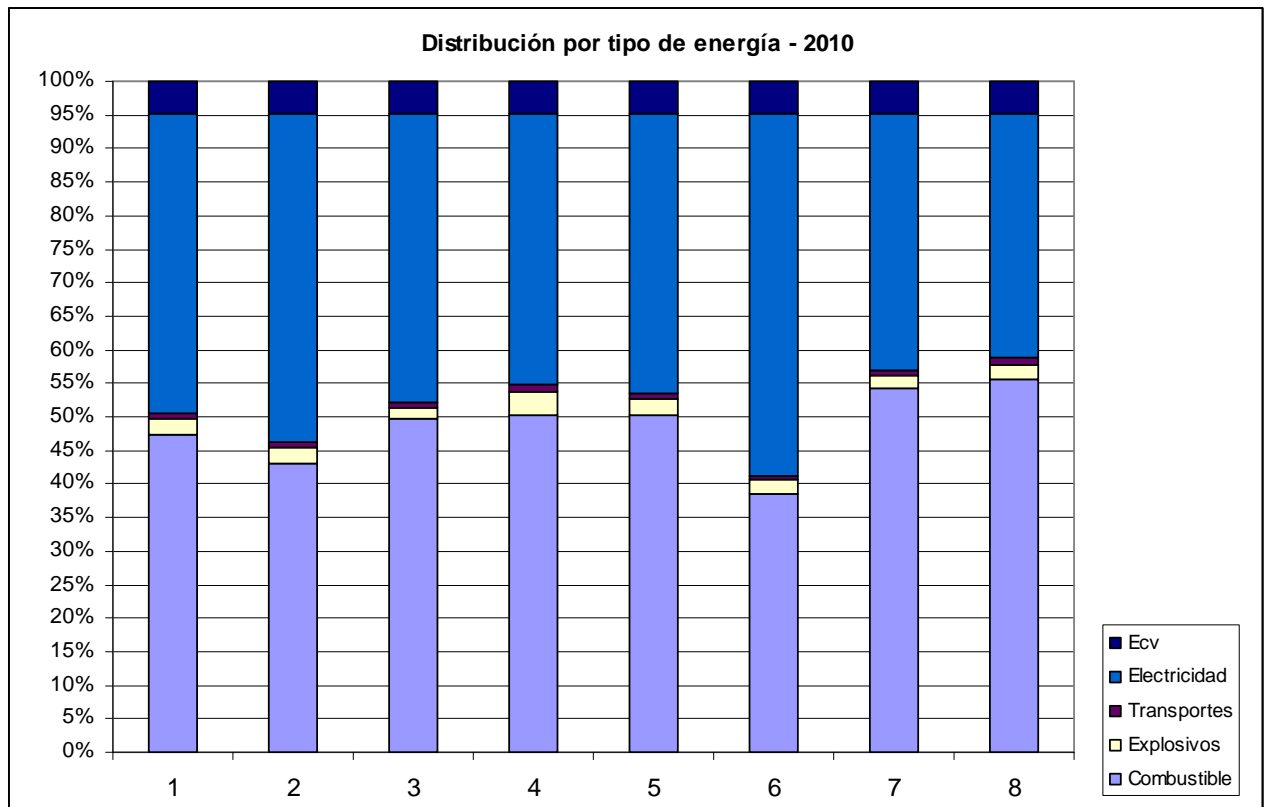


Figura F6.4.- Distribución de aportes energéticos según su origen (año 2010). Elaboración propia.

Existen pequeñas variaciones interanuales dentro de la misma cantera, que en el caso más desfavorable alcanzan el 12,5%. Con la información disponible no es posible identificar adecuadamente la causa de dicha variabilidad, aunque se considera probable que no obedezca a un único factor sino a una suma de ellos. En todo caso, dada su relativamente reducida magnitud, no se considera que este margen de variación deba invalidar los resultados obtenidos. Téngase en cuenta que la desviación típica ha resultado ser de 0,0066.

6.3.2.- Emisiones de dióxido de carbono

Análogamente, siguiendo el método expuesto en 6.2.3 se han determinado las emisiones de CO₂ por tonelada de árido producido. La Tabla T6.5 y las figuras F6.5 a F6.7 recopilan los resultados obtenidos.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Cantera	G _{esp.comb.} (tCO ₂ /t)		G _{esp.expl.} (tCO ₂ /t)		G _{esp.transp.} (tCO ₂ /t)		G _{esp.elec.} (tCO ₂ /t)		G _{esp.CV} (tCO ₂ /t)		G _{esp. Total} (tCO ₂ /t)	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
1	1,14 ·10 ⁻³	1,15 ·10 ⁻³	2,83 ·10 ⁻⁵	2,83 ·10 ⁻⁵	1,82 ·10 ⁻⁵	1,82 ·10 ⁻⁵	7,00 ·10 ⁻⁴	n.d.	9,35 ·10 ⁻⁵	5,88 ·10 ⁻⁵	1,98 ·10 ⁻³	n.d.
2	1,07 ·10 ⁻³	1,10 ·10 ⁻³	2,83 ·10 ⁻⁵	2,83 ·10 ⁻⁵	1,75 ·10 ⁻⁵	1,78 ·10 ⁻⁵	7,87 ·10 ⁻⁴	8,45 ·10 ⁻⁴	9,40 ·10 ⁻⁵	9,86 ·10 ⁻⁵	1,99 ·10 ⁻³	2,09 ·10 ⁻³
3	1,59 ·10 ⁻³	1,52 ·10 ⁻³	2,83 ·10 ⁻⁵	2,83 ·10 ⁻⁵	2,21 ·10 ⁻⁵	2,15 ·10 ⁻⁵	8,94 ·10 ⁻⁴	9,07 ·10 ⁻⁴	1,26 ·10 ⁻⁴	1,23 ·10 ⁻⁴	2,66 ·10 ⁻³	2,60 ·10 ⁻³
4	7,92 ·10 ⁻⁴	5,31 ·10 ⁻⁴	2,83 ·10 ⁻⁵	2,83 ·10 ⁻⁵	1,51 ·10 ⁻⁵	1,28 ·10 ⁻⁵	4,13 ·10 ⁻⁴	6,73 ·10 ⁻⁴	6,17 ·10 ⁻⁵	6,16 ·10 ⁻⁵	1,31 ·10 ⁻³	1,31 ·10 ⁻³
5	1,24 ·10 ⁻³	1,42 ·10 ⁻³	2,83 ·10 ⁻⁵	2,83 ·10 ⁻⁵	1,90 ·10 ⁻⁵	2,06 ·10 ⁻⁵	6,66 ·10 ⁻⁴	7,72 ·10 ⁻⁴	9,69 ·10 ⁻⁵	1,11 ·10 ⁻⁴	2,05 ·10 ⁻³	2,35 ·10 ⁻³
6	1,05 ·10 ⁻³	1,30 ·10 ⁻³	2,83 ·10 ⁻⁵	2,83 ·10 ⁻⁵	1,73 ·10 ⁻⁵	1,95 ·10 ⁻⁵	9,49 ·10 ⁻⁴	1,03 ·10 ⁻⁴	1,01 ·10 ⁻⁴	1,18 ·10 ⁻⁴	2,14 ·10 ⁻³	2,49 ·10 ⁻³
7	1,54 ·10 ⁻³	1,66 ·10 ⁻³	2,83 ·10 ⁻⁵	2,83 ·10 ⁻⁵	2,17 ·10 ⁻⁵	2,28 ·10 ⁻⁵	7,02 ·10 ⁻⁴	8,17 ·10 ⁻⁴	1,13 ·10 ⁻⁴	1,25 ·10 ⁻⁴	2,40 ·10 ⁻³	2,66 ·10 ⁻³
8	1,34 ·10 ⁻³	1,56 ·10 ⁻³	2,83 ·10 ⁻⁵	2,83 ·10 ⁻⁵	1,99 ·10 ⁻⁵	2,19 ·10 ⁻⁵	5,73 ·10 ⁻⁴	3,46 ·10 ⁻⁴	9,73 ·10 ⁻⁵	9,68 ·10 ⁻⁵	2,06 ·10 ⁻³	2,06 ·10 ⁻³
9	3,63 ·10 ⁻³	4,53 ·10 ⁻³	2,83 ·10 ⁻⁵	2,83 ·10 ⁻⁵	4,01 ·10 ⁻⁵	4,80 ·10 ⁻⁵	n.d.	n.d.	1,83 ·10 ⁻⁴	2,28 ·10 ⁻⁴	n.d.	n.d.
10	n.d.	9,91 ·10 ⁻⁴	n.d.	2,83 ·10 ⁻⁵	n.d.	1,68 ·10 ⁻⁵	n.d.	5,43 ·10 ⁻⁴	n.d.	7,81 ·10 ⁻⁵	n.d.	1,66 ·10 ⁻³

Tabla T6.5.- Emisiones de CO₂ parciales y total, por tonelada de árido producido. Elaboración propia.

El rango de emisiones de CO₂ en las diferentes canteras estudiadas muestra una amplitud semejante a la detectada en el caso de las emisiones energéticas. Las emisiones toman valores entre 1,31 de la cantera n^o4 hasta los 2,66 kgCO₂/t_{árido} de la cantera n^o 3. Las medias anuales son de 2,08 y 2,32 kgCO₂/t_{árido}, y la media de todos los valores calculados es de 2,15 kgCO₂/t_{árido}.

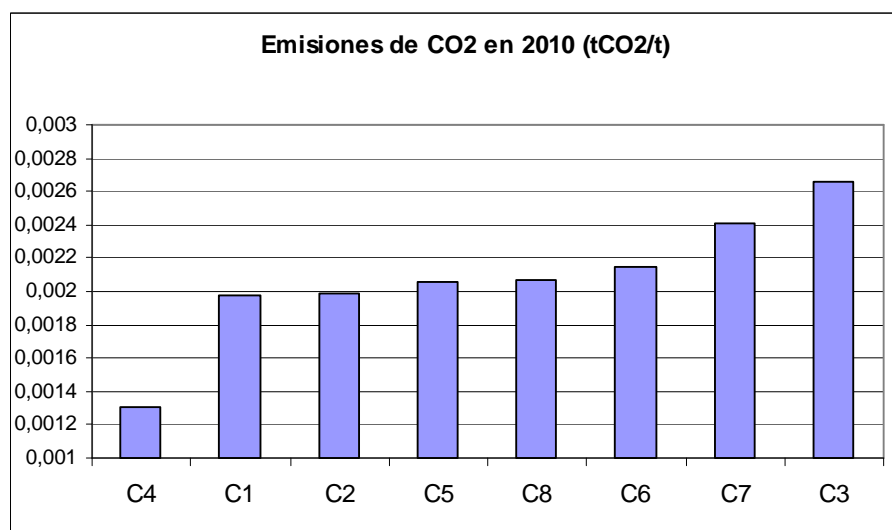


Figura F6.5.- Emisión de CO₂ por tonelada de árido producido en 2010. Elaboración propia.

El patrón mostrado por las emisiones, ordenadas de modo ascendente en las figuras F6.5 y F6.6, es muy similar al que presentan los consumos energéticos de las canteras. En este caso, las variaciones

interanuales de las emisiones de una misma cantera presentan diferencias menores a las observadas en los consumos energéticos, en este caso la desviación típica ha resultado ser de 0,00042 y, por tanto, las variaciones registradas tampoco invalidan los resultados obtenidos.

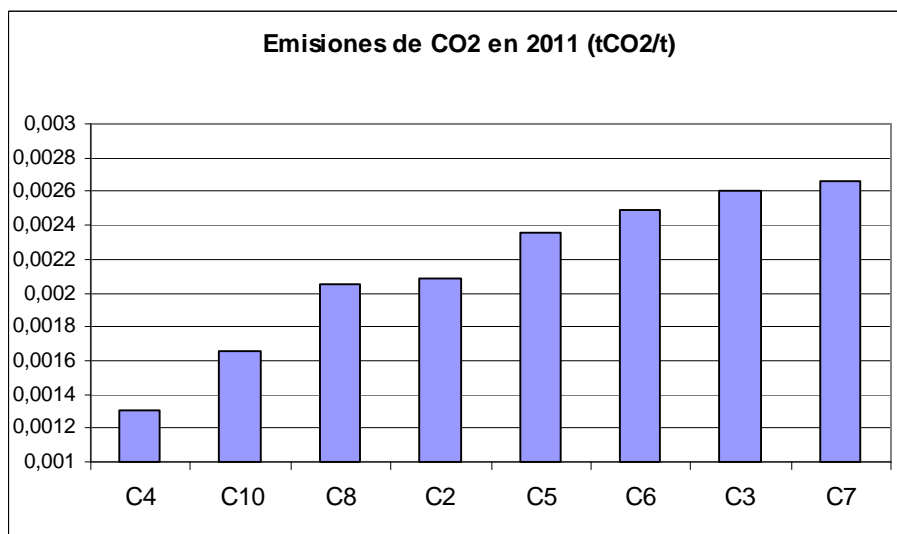


Figura F6. 6.- Emisión de CO₂ por tonelada de árido producido en 2011. Elaboración propia.

Por otra parte, en cuanto al reparto de las emisiones según la fuente a que se atribuyen, existe un claro predominio del CO₂ procedente de la combustión de gasóleo, frente al achacable al consumo de energía eléctrica, que se mantiene como la segunda gran fuente. Los restantes factores tienen una importancia residual.

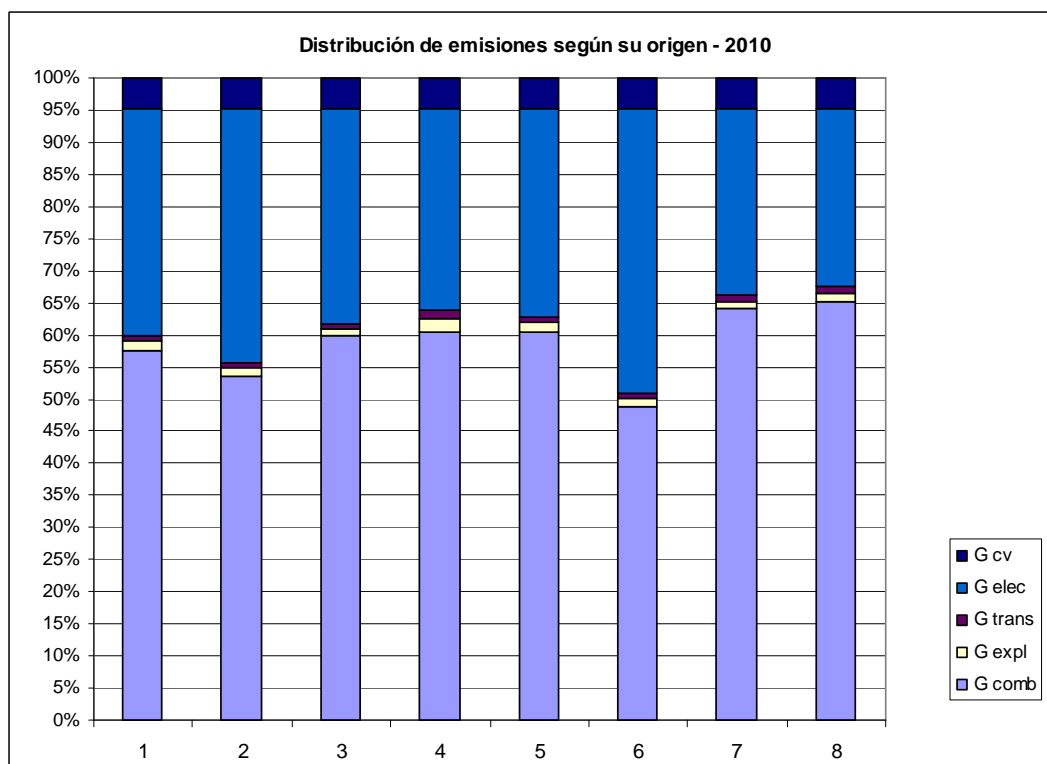


Figura F6.7.- Distribución de las emisiones de CO₂ por tonelada de árido producido, para el año 2010.

6.3.3.- Emisiones de otros contaminantes

En las tablas T6.6 a T6.8 se presentan los resultados de emisiones de NO_x, SO_x, VOC, CO y PM₁₀, deducidos de aplicar las expresiones indicadas en 6.2.4., desglosados según su procedencia sea del consumo de electricidad o de gasóleo, así como la emisión de partículas intrínseca a la extracción de roca. Finalmente, en la Tabla T6.9 se presenta el total de emisiones de los gases aludidos, obtenidos como sumatorio de las T6.6 a T6.8.

Concepto	Producción de áridos – consumo eléctrico				
	NO _x (g/t)	CO (g/t)	VOC (g/t)	SO _x (g/t)	PM ₁₀ (g/t)
min	0,777	1,067	0,502	1,449	0,261
med	1,208	1,660	0,781	2,253	0,406
max	1,671	2,297	1,681	3,118	0,562

Tabla T6.6.- Emisiones de otros contaminantes vinculadas al consumo eléctrico, por tonelada de árido producido.

Concepto	Producción de áridos – consumo de gasóleo				
	NO _x (g/t)	CO (g/t)	VOC (g/t)	SO _x (g/t)	PM ₁₀ (g/t)
min	6,307	1,433	0,363	0,003	0,178
med	14,373	3,265	0,827	0,007	0,405
max	38,912	8,839	2,239	0,019	1,096

Tabla T6.7.- Emisiones de otros contaminantes vinculadas al consumo de gasóleo, por tonelada de árido producido.

Concepto	Producción de áridos – extracción de roca				
	NO _x (g/t)	CO (g/t)	VOC (g/t)	SO _x (g/t)	PM ₁₀ (g/t)
min	-	-	-	-	25
med	-	-	-	-	50
max	-	-	-	-	100

Tabla T6.8.- Emisiones de otros contaminantes vinculadas a la extracción de roca, tomadas de EEA,2013.

Concepto	TOTAL Producción de áridos				
	NO _x (g/t)	CO (g/t)	VOC (g/t)	SO _x (g/t)	PM ₁₀ (g/t)
min	7,084	2,500	0,865	1,452	25,439
med	15,581	4,924	1,608	2,260	50,811
max	40,583	11,135	3,320	3,137	101,658

Tabla T6.9.- Emisiones totales de otros contaminantes, por tonelada de árido producido.

Se puede destacar que la emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) procede mayoritariamente del consumo de gasóleo en la maquinaria, mientras que los óxidos de azufre (SO_x) se atribuyen en mayor

medida al consumo eléctrico. Como era de esperar, la actividad extractiva de la cantera es la que genera un mayor volumen de emisiones de partículas.

6.4 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se ha establecido una metodología del tipo ACV (análisis del ciclo de vida), similar a la del Capítulo 4, para estimar el consumo de energía y las emisiones contaminantes en la producción de áridos para su uso en hormigones estructurales. Al igual que allí, se ha propuesto un modelo para realizar dichas estimaciones. Los resultados son del mismo tipo que los de los capítulos anteriores, estimándose los mismos parámetros. Además de la habitual revisión de la literatura existente, que no registraba estudios para España con el mismo alcance que aquí se ha empleado, se han recopilado datos de plantas productoras reales del norte de España, se han visitado plantas en funcionamiento, y se han mantenido reuniones con expertos del sector. Con todo ello se han realizado las correspondientes estimaciones, que se estiman generalizables a nuestro país, y los resultados de conjunto obtenidos se resumen en la Tabla T6.10 (véase el resto del capítulo para más detalle).

Una vez más, los resultados de este capítulo, junto con los oportunos resultados de los cálculos de los impactos del transporte que se realizan en el Anejo 3 de esta Tesis, han formado parte del estudio ambiental del ciclo de vida del hormigón que se ha abordado en el Capítulo 7.

Con respecto a los resultados obtenidos mediante el estudio resumido en este capítulo, en la Tabla T6.10 se presenta una recopilación de datos relativos al consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono en la producción de áridos, tomados de diferentes fuentes bibliográficas.

Concepto	E (GJ/t)	G (tCO ₂ /t)	País	Referencia
Árido fino	-	0,0139	AUS	Flower y Sanjayan (2007)
Árido grueso – granito	-	0,04590	AUS	
Árido grueso – basalto	-	0,03570	AUS	
Árido (general)	0,1	0,0050	UK	Hammond y Jones (2008)
Árido (general)	0,083	0,0052	UK	Hammond y Jones (2011)
Arena	0,1	0,0069	NZ	Alcorn (2003)
Árido fino de río	0,03	0,0012	NZ	
Árido procedente de roca	0,06	0,0031	NZ	
Árido (general)	0,04	0,0023	NZ	
Árido (general)	0,124	-	IRE	Goggins et al. (2010)
Árido - piedra machacada	0,0738	-	USA	Nisbet et al. (2000)
Árido - arena y grava	0,0422	-	USA	

Tabla T6.10.- Valores medios de consumo de energía primaria y emisión de CO₂ para la producción de áridos, según diferentes fuentes bibliográficas.

Por su parte, la Tabla T6.11 resume los resultados obtenidos tras el análisis de los datos disponibles. Se observa que los consumos energéticos y emisiones de dióxido asociados a las canteras estudiadas se encuentran dentro del orden de magnitud de los indicados por la bibliografía, si bien sus valores son sensiblemente inferiores a los consultados. Los valores más próximos son los ofrecidos por Alcorn (2003).

Valor	Energía (GJ/ t)	Emisión CO ₂ (t/t)	Emisión NO _x (g/t)	Emisión CO (g/t)	Emisión VOC (g/t)	Emisión SO _x (g/t)	Emisión PM ₁₀ (g/t)
Mínimo	0,021	0,0013	7,084	2,500	0,865	1,452	25,439
Medio	0,034	0,0022	15,581	4,924	1,608	2,260	50,811
Máximo	0,043	0,0027	40,583	11,135	3,320	3,137	101,658

Tabla T6.10.- Resumen de resultados de los cálculos realizados.

Una de las posibles causas de las aludidas diferencias a la baja puede encontrarse en la elevada incidencia de la energía eléctrica sobre los parámetros estudiados y el hecho de que el impacto ambiental de la generación de electricidad en España sea inferior al de otros países.

Por ejemplo, en Flower y Sanjayan (2007), se indica que el factor de emisión del sistema eléctrico empleado en el estudio es el correspondiente al estado australiano de Melbourne en 2004-2005, de valor 1,392 tCO₂/MWh. Este factor es más de 4 veces superior al calculado para España en 2010. La diferencia reside en que en Melbourne el peso de la generación en centrales de carbón (la fuente de mayor emisividad) sobre el total fue del 91,3%, frente a un 16,8% en España en 2010 (véase el Anejo 2). Además, el peso total de las energías renovables en Melbourne era del 2%, mientras que en España estas fuentes supusieron más del 22% de la energía generada. Adicionalmente, en España un 6% de la energía procedió de centrales nucleares, inexistentes en la región australiana considerada. De esta forma, las emisiones señaladas por Flower y Sanjayan para la producción de áridos graníticos son, aproximadamente, unas 20 veces superiores a las emisiones medias determinadas en este trabajo para las canteras estudiadas.

Por un lado, debe recordarse que los datos disponibles corresponden a canteras de un mismo tipo, de material granítico. Por tanto, los resultados anteriores resultarían más adecuados para caracterizar este tipo de árido que para aplicarlos al árido en general. Es posible que si se analizan otros tipos de cantera se encontrasen resultados diferentes. Sin embargo, es probable que los ratios aquí obtenidos sean adecuados para su uso generalizado teniendo en cuenta que, por un lado, como se verá más adelante en esta Tesis, al tratarse de un modelo de hormigón estructural, los mayores impactos corresponden al cemento (y dentro del cemento al clinker), al acero y al transporte. Por tanto, las variaciones que pudiese haber en los ratios de los áridos no van a influir de forma relevante sobre el conjunto. Por otro lado, el análisis de la literatura existente (por ejemplo, véanse los ratios de Flower y Sanjayan (2007) consignados en la Tabla T6.10) no parece indicar que vaya a haber diferencias importantes al alza, con respecto a los ratios calculados; en algunos casos, por ejemplo para el árido basáltico (Flower y Sanjayan (2007)), los ratios son menores. Finalmente este subsector, como el del acero, es poco proclive a revelar datos de sus procesos, y no es probable que a corto plazo se puedan obtener datos generales para diferentes materiales rocosos, salvo que las asociaciones de este subsector se decidiesen a revelarlos, en el caso de que los tuvieran.

En consecuencia, teniendo en cuenta todo lo que se acaba de decir, los ratios obtenidos de este capítulo se han tomado como generales. A pesar de las dificultades ya comentadas, en trabajos posteriores se debería intentar ampliar el estudio a otros tipos de cantera, así como a extracciones de áridos no procedentes de machaqueo, en los cuales cabría esperar, a priori, menores necesidades de energía. Sería también conveniente realizar un análisis que abarcase un periodo de tiempo más amplio, de modo que se identificasen con mayor precisión posibles fluctuaciones interanuales del

consumo específico de energía dentro de una misma instalación, y se pudiese ligar dicha fluctuación a los factores que afectan a la producción.

El alcance del análisis realizado llega hasta la expedición del material en la cantera / planta de trituración, lo que en la terminología habitual de análisis de ciclo de vida se conoce como “de la cuna a la puerta” (*cradle to gate*). Como se ha indicado, a partir de este momento el árido debe ser transportado a sus puntos de consumo (por ejemplo, las plantas de hormigón preparado). Este transporte deja de ser rentable a distancias superiores a los 50 km, ya que su coste supera al del árido. Con los factores empleados en este trabajo, un transporte por carretera a 50 km añade a cada tonelada de árido, respectivamente, 0,0735 GJ y 0,0051 tCO₂, que son valores del mismo orden de magnitud de los resultados obtenidos para la producción del árido.

**CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS
EMISIONES CONTAMINANTES. PARTE IV: EL HORMIGÓN
ESTRUCTURAL**

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES. PARTE IV: EL HORMIGÓN ESTRUCTURAL

7.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos previos se ha abordado el estudio de los componentes del hormigón (cemento, acero y áridos) por separado. Los siguientes eslabones del proceso implican la mezcla de cemento, áridos y agua, así como la posible incorporación de pequeñas cantidades de aditivos, para dar lugar al hormigón fresco; el transporte del mismo al emplazamiento de la estructura; y finalmente, la colocación de armaduras y el vertido y vibrado del hormigón.

El presente capítulo aborda, en primer lugar, el análisis del consumo energético y de las emisiones contaminantes de dichas operaciones. A diferencia de los estudios realizados en los tres capítulos anteriores, en este caso la dispersión y variabilidad de instalaciones y sistemas dificulta la obtención de datos estadísticos fiables que puedan extrapolarse a la generalidad del sector. La literatura existente tampoco aporta información útil al respecto.

Por este motivo el estudio se aborda desde el plano teórico, planteando una serie de hipótesis de funcionamiento en base a la información técnica proporcionada por fabricantes de los principales equipos empleados en las operaciones aludidas. También se han realizado dos valiosas visitas a instalaciones (Pita Graña, 2012; Armacon, 2016).

Una versión preliminar, de los aspectos relacionados con el consumo de energía y las emisiones de CO₂ relativos a la producción, transporte y ejecución del hormigón, que constituyen los aspectos más importantes de los posibles impactos ambientales, han sido publicados en un congreso internacional (Mel et al., 2014d).

Una vez estimados el consumo de energía y las emisiones de contaminantes de la producción y ejecución del hormigón, en el resto del presente capítulo se integran dichos resultados con los obtenidos en los capítulos 4, 5 y 6, relativos a cemento, acero y áridos, creándose un modelo de cálculo que permite estimar el consumo de energía primaria y las emisiones de contaminantes de una determinada estructura de hormigón, en función de su dosificación, armado y distancias de transporte, entre otros aspectos.

Aplicando este modelo a varias configuraciones habituales de estructuras, ha sido posible establecer los órdenes de importancia de cada uno de los aspectos que forma parte del impacto ambiental global del hormigón estructural, así como plantear un análisis crítico del Anejo 13 de la EHE-08.

7.2 CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES CONTAMINANTES EN LA PRODUCCIÓN Y EJECUCIÓN DEL HORMIGÓN: METODOLOGÍA

Las plantas de hormigón, auto-hormigoneras, bombas y vibradores son, en general, equipos comerciales que se venden o instalan por empresas especializadas. Para realizar el presente análisis de sus consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono se ha optado por estimar estos parámetros a partir de las características técnicas de la maquinaria, aportadas por los fabricantes. En este caso no se dispone de una recopilación de datos reales procedentes de una empresa concreta o de una asociación de empresarios del sector. Sin embargo, se considera que las documentaciones técnicas de que se ha dispuesto, junto con las visitas y entrevistas realizadas, permiten disponer de un modelo parcial suficientemente adecuado, teniendo en cuenta que su influencia sobre el modelo completo no es relevante, ya que los mayores impactos, como se verá más adelante en esta Tesis, son los del cemento (y en particular, del clinker), el acero y el transporte.

El desarrollo detallado del cálculo, así como sus resultados, serán abordados en el epígrafe siguiente, para cada uno de los aspectos estudiados. En cuanto a la metodología general que se ha seguido, ha constado de los siguientes pasos:

- i) Consulta de información técnica de los diferentes equipos existentes en el mercado.
- ii) Establecimiento del rango de tamaños o capacidades disponibles y estimación del valor más probable.
- iii) Determinación de la potencia consumida, en función de las especificaciones técnicas.
- iv) Valoración del consumo eléctrico o de gasóleo por unidad de volumen de hormigón producido o manejado, y traducción de dicho consumo a términos de energía primaria y emisiones de CO₂ y otros contaminantes.
- v) Estimación de los consumos y emisiones asociados al ciclo de vida del equipo o instalación.

La base de cálculo empleada será, en todos los casos, un metro cúbico (1 m³) de hormigón.

SEOPAN (2008) aporta datos generales de consumos energéticos en función de la potencia instalada, así como de los consumos secundarios (mantenimiento, reparación, etc.) expresados como un porcentaje de los anteriores. Aunque en dicha referencia estos consumos secundarios se contabilizan en términos económicos, se entiende que es asumible considerar los mismos porcentajes en términos energéticos. Se recopila esta información en la Tabla T7.1.

Consumo Principal		Consumo Secundario
Gasóleo (L/h por kW instalado)	0,15-0,20	15% del consumo ppal.
Gasolina (L/h por kW instalado)	0,30-0,40	8% del consumo ppal.
Electricidad (kWh por kW instalado)	0,60-0,70	5% del consumo ppal.

Tabla T7.1.- Consumos principales y secundarios en maquinaria de construcción. Fuente: SEOPAN (2008).

Por otra parte, los factores de energía primaria y emisiones de CO₂ y de otros contaminantes asociados a los consumos de gasóleo y de energía eléctrica, así como al transporte por carretera, se van a tomar de los cálculos realizados en los Anejos 2 y 3, respectivamente. De todas formas, en la Tabla T7.2 se recogen los factores esenciales.

Concepto		Referencia
Valor Calorífico Neto gasóleo (GJ/t)	43,00	Unión Europea (2007)
Factor Energía Primaria gasóleo	1,085	Furuholt (1995)
Factor Energía Primaria energía eléctrica 2010 (GJ/MWhe)	6,20	Mel et al. (2013)
Factor de emisión del gasóleo (tCO ₂ /tgasóleo)	3,182	Unión Europea (2007)
Factor de emisión en la producción de gasóleo	1,10	Furuholt (1995)
Intensidad energética transporte en camión (MJ/t-km)	1,470	Pérez y Monzón (2008) Eriksson et al. (1996)
Factor de emisión electricidad 2010 (tCO ₂ /MWhe)	0,301	Mel et al. (2013)
Factor emisión transporte en camión (kgCO ₂ /t-km)	0,980	Pérez y Monzón (2008) Eriksson et al. (1996)

Tabla T7.2: Factores de energía primaria y emisiones de CO₂ para el gasóleo, la energía eléctrica y el transporte por carretera.

7.3 CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES CONTAMINANTES EN LA PRODUCCIÓN Y EJECUCIÓN DEL HORMIGÓN: RESULTADOS

7.3.1.- Plantas de hormigón preparado

Se ha consultado información técnica de varios fabricantes (Elkon, 2013; Liebherr, 2013; Meka, 2013; Putzmeister, 2013; Sany, 2013; Schwing, 2013). Todos ellos ofrecen diferentes modelos de plantas, cuyas capacidades oscilan entre los 20 m³/h para una planta móvil compacta hasta los 180 m³/h de una instalación estacionaria de gran tamaño. Las figuras F7.1 a F7.3 representan gráficamente la relación entre potencia eléctrica total y capacidad de las plantas ofrecidas por los fabricantes Schwing y Meka. En el caso de Schwing, la Figura F7.2 se refiere a plantas de tipo vertical y la Figura F7.3 a plantas horizontales. Como se observa en las figuras F7.1 a F7.3, la relación entre ambos parámetros se aproxima adecuadamente mediante rectas de regresión lineal.

Empleando las ecuaciones de las rectas de regresión de cada gráfica se han determinado las potencias teóricas de tres plantas, de capacidades pequeña (40 m³/h), mediana (100 m³/h) y grande (180 m³/h). A continuación se ha hallado la media de las potencias y ésta se ha dividido por la capacidad de la planta, para obtener la potencia eléctrica instalada por m³ de hormigón. Los resultados se muestran en la Tabla T7.3.

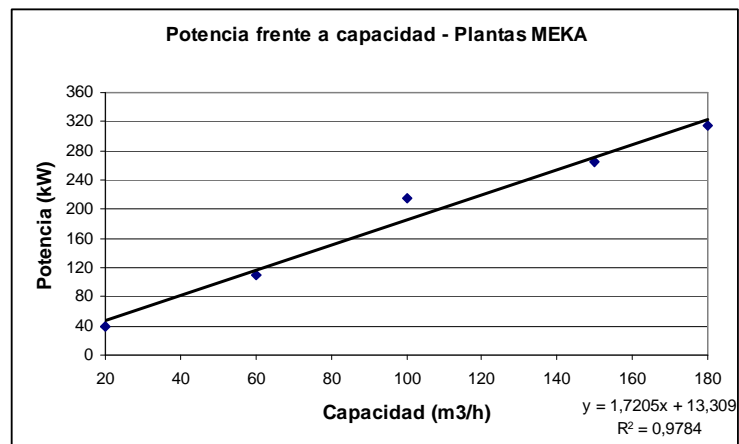


Figura F7.1.- Potencia eléctrica frente a producción de hormigón para plantas Meka (2013).

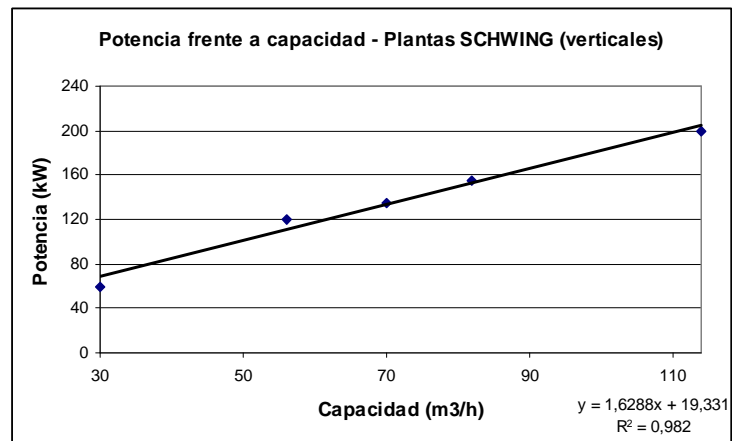


Figura F7.2.- Potencia eléctrica frente a producción de hormigón para plantas Schwing (2013) de tipo vertical.

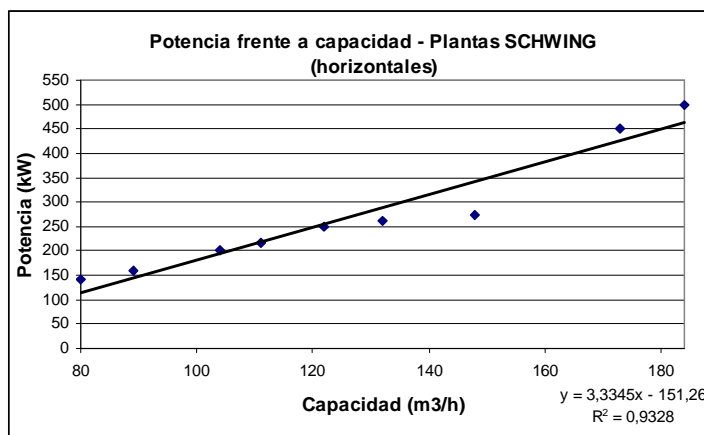


Figura F7.3.- Potencia eléctrica frente a producción de hormigón para plantas Schwing (2013) de tipo horizontal.

Capacidad (m3/h)	Potencia según fig.1 (kW)	Potencia según fig.2 (kW)	Potencia según fig.3 (kW)	Potencia media (kW)	Potencia específica (kW/m3)
40	82,13	84,48	(*)	83,31	2,08
100	185,36	182,21	182,19	183,25	1,83
180	323,00	312,52	448,95	361,49	2,01

Tabla T7.3.- Potencia específica de plantas de hormigón, a partir de datos de Meka (2013) y Schwing (2013), y de las figuras F7.1 a F7.3. (*) El fabricante no refleja en sus catálogos plantas horizontales de capacidades inferiores a 80 m³/h.

Con los datos anteriores, se obtiene un rango de potencias por m³ de hormigón de 1,83 – 2,08 kW/m³. El valor medio dentro de este rango sería de 1,96 kW/m³.

Dadas las potencias específicas anteriores, se pueden obtener los consumos eléctricos correspondientes por m³ de hormigón empleando el factor de 0,7 kWh/kW indicado en la Tabla T7.1. El consumo resultante debe ser incrementado en un 5% para cubrir los consumos secundarios, como se indica también en dicha Tabla T7.1.

A falta de datos más precisos, se estima el impacto de las restantes etapas del ciclo de vida de la planta (fabricación, transporte, desmantelamiento y reciclaje) en otro 5% adicional sobre la energía consumida durante el funcionamiento. En SEOPAN (2008) se indica, de modo orientativo, que la vida media de este tipo de instalación son aproximadamente 10.000 h, con un funcionamiento estimado de 1.000 h/año.

Por último, los consumos anteriores pueden ser traducidos en términos de energía primaria y emisiones de CO₂ y otros contaminantes (NO_x, SO_x, CO, VOC, PM₁₀) mediante los factores indicados en los Anejos 2 y 3, empleando los mismos procesos de cálculo que se han utilizado en los capítulos 4, 5 y 6. Los resultados de este proceso se reflejan en las tablas T7.4 y T7.5.

Valor	Potencia específica (kW/m ³)	Consumo (kWh/m ³)	Consumo total (kWh/m ³)
Mínimo	1,83	1,28	1,41
Medio	1,96	1,37	1,51
Máximo	2,08	1,46	1,61

Tabla T7.4.- Potencias y consumo eléctrico por m³ de hormigón procesado en planta.

Valor	Energía primaria (MJ/m ³)	Emisión CO ₂ (kg/m ³)	Emisión NO _x (g/m ³)	Emisión CO (g/m ³)	Emisión VOC (g/m ³)	Emisión SO _x (g/m ³)	Emisión PM ₁₀ (g/m ³)
Mínimo	8,76	0,425	0,719	0,988	0,465	1,341	0,242
Medio	9,38	0,455	0,770	1,058	0,498	1,436	0,259
Máximo	9,95	0,483	0,817	1,123	0,528	1,524	0,275

Tabla T7.5.- Rango de valores obtenido para el consumo energético y la emisión de contaminantes por m³ de hormigón procesado en planta.

De esta forma, el consumo energético asociado a la operación de una planta de hormigón se encontraría entre 8,76 y 9,95 MJ/m³, y las emisiones de dióxido de carbono entre 0,425 y 0,483 kgCO₂/m³.

En los capítulos precedentes se han determinado estos parámetros ambientales para los principales componentes del hormigón estructural: el cemento, los áridos y el acero. No se había abordado, por tanto, la incorporación de aditivos que se realiza en las plantas de hormigón preparado, para mejorar las propiedades del material. Se ha obtenido información acerca de los mismos en Roncero (2011). La cantidad de aditivo añadida al hormigón es muy pequeña, suele estar por debajo del 1%, y por ello su impacto ambiental podría despreciarse. No obstante, se indican en la Tabla T7.6 los factores energéticos y de emisiones de diferentes aditivos, citados por Roncero.

Parámetro	Aditivo					
	Plastificante	Super - Plastificante	Retardante de fraguado	Acelerador De fraguado	Incluser de aire	Hidrofugante de masa
Energía (MJ/kg)	4,60	18,30	15,70	22,80	2,10	5,60
Emisiones CO ₂ (Kg/kg)	0,22	0,72	0,076	1,20	0,086	0,25
Emisiones NO _x (g/kg)	0,52	1,8	1,7	2,3	0,35	1,6
Emisiones CO (g/kg)	0,11	0,55	0,81	1,00	0,11	0,57
Emisiones VOC (g/kg)	0,55	1,49	58	2,5	0,62	2,8
Emisiones SO _x (g/kg)	0,85	3,6	1,4	2,8	0,32	0,88

Tabla T7.6.- Consumo energético y emisiones contaminantes de aditivos empleados en la producción de hormigón. Fuente: Roncero (2011).

El rango de energías se encontraría entre 2,10 y 22,80 MJ/kg, y el de emisiones de CO₂ entre 0,076 y 1,2 kgCO₂/kg. Entre las emisiones de otros contaminantes, llama la atención el elevado nivel de emisión de compuestos orgánicos volátiles en los retardantes de fraguado. Los aditivos plastificantes son los más empleados, dado que las consistencias más habituales en España son las blandas y fluidas, según Roncero (2011). Los inclusores de aire o los hidrofugantes de masa se emplean únicamente en aplicaciones concretas.

7.3.2.- Transporte de los componentes del hormigón

Es necesario también al análisis la contribución realizada por los procesos de transporte involucrados en la construcción de una estructura de hormigón. Este epígrafe tratará, por un lado, el transporte de materias primas hasta la planta de hormigón preparado: cemento, áridos y aditivos. También se abordará el transporte de acero hasta la planta de ferralla y de ésta a la obra. El transporte de hormigón fresco se tratará en el epígrafe siguiente.

Dada la gran dispersión de instalaciones por todo el territorio nacional, los transportes de materias primas hasta la planta de hormigón preparado se realizan por carretera, de un modo muy mayoritario, aunque en el caso del cemento también se recurre al transporte ferroviario o marítimo.

Las distancias recorridas dependen del material. Los áridos habitualmente son de origen próximo, debido a su relativa abundancia y a que el transporte a grandes distancias multiplica su precio. Por este motivo se considera que su distancia de transporte puede oscilar entre 15 y 60 km. El cemento puede tener que realizar trayectos de mayor alcance, que podrían llegar a los 400 km. Existen 35 fábricas de cemento repartidas por España, la mayoría en el entorno de grandes zonas urbanas o en la costa. Estas fábricas pueden expedir sus productos, bien directamente, bien a centros de distribución secundarios. Consultadas diversas fuentes del sector, proponen los 200 km como valor más probable. Los aditivos, según Roncero (2011), suelen ser de fabricación local, proviniendo de subproductos de otras industrias o del refino del petróleo. Se toma para ellos un rango de entre 50 y 300 km, siendo el valor más probable el de 150 km. En la Tabla T7.7 se indican los valores mínimos, medios y máximos que se han estimado para las distancias de transporte de cemento, árido y aditivos.

Componente	Distancia de transporte (km)		
	Mínima	Media	Máxima
Cemento	50	200	400
Árido	15	30	60
Aditivos	50	150	300

Tabla T7.7.- Distancias mínimas, medias y máximas de transporte de los componentes del hormigón.

El transporte del acero se divide en dos etapas: de la planta siderúrgica a la planta de ferralla y de la planta de ferralla a la ubicación de la obra. Según las fuentes del sector consultadas, la mayoría del acero corrugado empleado en España es de origen peninsular, no estando el mercado repartido en base a la ubicación geográfica de las fábricas. Existen tres productores de redondos corrugados (Arcelor, Megasa Siderúrgica y Celsa), que sirven pedidos en toda la península. Para el transporte entre la siderúrgica y la ferralla, en determinados casos se utiliza el transporte marítimo, aunque lo

más habitual es el transporte por carretera. En el mercado interior las distancias máximas que recorren los camiones pueden estar en el orden de 1.200 km (dos días de viaje), mientras que lo más frecuente es realizar viajes de un día (hasta 600 km). Como valor mínimo se podría tomar el mercado local, con distancias del orden de 100 km. Con objeto de reducir costes, es una práctica habitual que los viajes de vuelta de los camiones se hagan cargados con otra mercancía; por ejemplo, chatarra empleada como materia prima en las fábricas. Por este motivo, a efectos de cálculo, se tiene en cuenta únicamente el viaje de ida.

El transporte entre la planta de ferralla y la obra sí se realiza íntegramente por carretera, siendo las distancias mucho menores a las anteriores. Se han considerado unas distancias mínima y máxima, respectivamente, de 50 y 200 km. La distancia media se estima en unos 100 km.

El impacto de estos transportes se evalúa empleando los factores de energía y emisiones propuestos en el Anejo 3 (Mel et al., 2013).

La cantidad de cada componente que se necesita transportar para producir 1 m³ de hormigón depende, como es evidente, de la dosificación empleada y de la cuantía de armado. Las dosificaciones empleadas por las plantas de hormigón suelen ser reservadas, dado que en ellas radica parte de la ventaja competitiva de la empresa sobre sus competidores. Conocidos los parámetros y distancias reales de un caso determinado, es posible determinar el consumo energético y las emisiones asociadas por aplicación directa del Anejo 3 de esta Tesis. Teniendo en cuenta que los hormigones más empleados en España son del tipo HA-25 y HA-30, se propone como base de cálculo una dosificación media (a/c = 0,57) de 350 kg de cemento, 1.850 kg de áridos y 15 kg de aditivo por m³ de hormigón (total: 2.400 kg). Con esta dosificación y los factores energéticos y de emisiones asociados al transporte por carretera se elabora la Tabla T7.8.

Valor	Energía (MJ/m ³)	Emisión CO ₂ (kg/m ³)	Emisión NO _x (g/m ³)	Emisión CO (g/m ³)	Emisión VOC (g/m ³)	Emisión SO _x (g/m ³)	Emisión PM ₁₀ (g/m ³)
Mínimo	67,62	4,733	472,6	107,4	27,2	0,227	13,32
Medio	187,79	13,145	1312,9	298,2	75,5	0,630	36,99
Máximo	375,59	26,291	2625,9	596,5	151,1	1,259	73,97

Tabla T7.8.- Valores mínimo, medio y máximo de energía y emisión de CO₂ en transporte de los componentes del hormigón a la planta por m³ de hormigón producido, para los hormigones más frecuentes. Fuente: elaboración propia.

El transporte de acero, en las dos etapas mencionadas (hasta la planta de ferralla y de ésta a la obra), se evalúa de igual modo, en este caso por kg de acero. La cuantía de armado determinará la cantidad de acero por m³ de hormigón y, con ello, la contribución de su transporte al impacto total. Para evaluar la contribución del transporte marítimo en los recorridos entre la fábrica y la planta de ferralla, se supone que los viajes de 100 km se realizan exclusivamente por carretera, y que en los viajes de 600 y 1.200 km, respectivamente, un 20% y un 30% se pueden realizar en barco, y el resto se hacen por carretera. Los resultados se muestran en las tablas T7.9 y T7.10.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Valor	Energía (MJ/kg)	CO ₂ (kg/kg)	NO _x (g/t)	CO (g/t)	VOC (g/t)	SO _x (g/t)	PM ₁₀ (g/t)
Mínimo (100 km)	0,147	0,0103	1027,7	233,4	59,1	0,493	28,9
Medio (600 km)	0,754	0,0531	6166,4	1400,7	354,8	2,96	173,7
Máximo (1200 km)	1,380	0,0977	12332,9	2801,4	709,6	5,91	347,4

Tabla T7.9.- Rango estimado de consumos de energía primaria y emisiones contaminantes en el transporte de aceros corrugados entre la planta siderúrgica y la planta de ferralla.

Valor	Energía (MJ/kg)	CO ₂ (kg/kg)	NO _x (g/t)	CO (g/t)	VOC (g/t)	SO _x (g/t)	PM ₁₀ (g/t)
Mínimo (100 km)	0,073	0,0052	513,9	116,7	29,7	0,246	14,5
Medio (600 km)	0,147	0,0103	1027,7	233,5	59,1	0,493	28,9
Máximo (1200 km)	0,294	0,0206	2055,5	466,9	118,3	0,986	57,9

Tabla T7.10.- Rango estimado de consumos de energía primaria y emisiones contaminantes en el transporte de aceros corrugados entre la planta de ferralla y la ubicación de la obra.

7.3.3.- Transporte del hormigón fresco

Consultando documentaciones técnicas de varios fabricantes (Schwing, 2013; Liebherr, 2013; Sany, 2013; Putzmeister, 2013), se encuentra que existen en el mercado auto-hormigoneras con capacidades comprendidas entre los 6 y los 15 m³. Las cubas pueden ser accionadas por el propio motor del camión, o por medio de un motor auxiliar independiente. En ambos casos el consumo de combustible será mayor que en un transporte convencional por carretera.

Se ha observado que la potencia del motor del camión no está tan correlacionada con la capacidad de la cuba, como ocurría en las plantas de hormigón preparado. De esta forma, las auto-hormigoneras Schwing con capacidades entre 9 y 12 m³ comparten el mismo motor auxiliar de 88 kW, y los vehículos del fabricante Sany, con capacidades entre 6 y 10 m³, emplean un motor de 240 kW para el conjunto camión-cuba.

El rango de valores de consumo energético y emisión de CO₂ durante el transporte del hormigón dependerá, por un lado, del vehículo empleado; a mayor capacidad de la cuba, menor será la repercusión de los consumos por m³ servido. Por otra parte, dependerá de la distancia recorrida; a mayor distancia, mayor consumo.

A continuación se determina, en primer lugar, el consumo por m³ de hormigón transportado, en base a la información ofrecida por Sany (2013) (la documentación de otros fabricantes no incluye los datos de potencia y consumo). La Tabla T7.11 muestra las capacidades, potencias y pesos de los vehículos de su gama.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Capacidad (m³)	6	8	9	10	12
Potencia (kW)	240	240	240	240	292
Peso (kg)	14.000	14.000	14.800	14.800	16.500

Tabla T7.11.- Capacidad nominal, potencia del motor y peso en vacío de camiones hormigonera. Fuente: Sany (2013).

Para el conjunto de vehículos anterior, el fabricante indica unos valores medios de consumo de gasóleo de 34 L/h con la cuba cargada y 32 L/h descargados, a una velocidad de 50 km/h. De esta forma se puede determinar el consumo por km, y a partir de ahí obtener la energía primaria consumida y las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes, mediante los factores incluidos en el Anejo 3 (véase la Tabla T7.2 de este capítulo).

Dado que también se conoce el peso de los vehículos, es posible realizar una estimación del impacto de la construcción del equipo en su ciclo de vida. Se asumen las siguientes hipótesis:

- El 90% del peso de la auto-hormigonera es acero.
- El acero empleado es el considerado como medio a nivel mundial (Hammond y Jones, 2011): 60% de acero primario y 40% de acero reciclado.
- Los consumos asociados al acero suponen el 95% de los correspondientes a la fabricación del vehículo.
- La vida útil media de una auto-hormigonera es de 6.500 horas. En SEOPAN (2008) se indica un rango de 5.000 a 8.000 h.
- La velocidad media durante su funcionamiento es de 50 km/h.

También debe tenerse en cuenta que, como se indica en la Tabla T7.1, los equipos diesel presentan unos consumos secundarios del orden del 15% del consumo principal, en mantenimiento y reparaciones. Con las hipótesis anteriores se obtiene que la energía y emisiones asociados a la producción del camión hormigonera se encuentran entre un 4,2 y un 4,9% de las correspondientes a la vida útil del equipo (consumos principal y secundarios), en la línea de lo asumido para las plantas de hormigón y de lo indicado en Eriksson et al. (1996) para el transporte ordinario por carretera (5%). La Tabla T7.12 incluye los resultados de los cálculos realizados con respecto al consumo de energía primaria y emisiones contaminantes en el transporte de hormigón fresco, por m³ y km recorrido.

Valor	Energía (MJ/ m³·km)	Emisión CO₂ (kg /m³·km)	Emisión NO_x (g/ m³·km)	Emisión CO (g/ m³·km)	Emisión VOC (g /m³·km)	Emisión SO_x (g m³·km)	Emisión PM₁₀ (g/ m³·km)
Mínimo	1,329	0,100	1,049	0,238	0,060	0,0005	0,0295
Medio	1,758	0,132	1,385	0,315	0,080	0,0007	0,0390
Máximo	2,627	0,197	2,066	0,469	0,119	0,0010	0,0582

Tabla T7.12.- Energía primaria y emisiones contaminantes en el transporte de hormigón fresco, por m³ y km. Fuente: elaboración propia.

De dicha tabla se obtienen rangos de energía primaria y emisiones de 1,33-2,63 MJ/m³·km y 0,10-0,20 kgCO₂/m³·km, respectivamente. Los valores medios son los correspondientes a la cuba de 9 m³, que resultan ser de 1,758 MJ/m³·km y 0,132 kgCO₂/m³·km.

La segunda variable a considerar es la distancia de transporte. Ésta se encuentra limitada por el tiempo que puede permanecer el hormigón dentro de la cuba, que es de 90 minutos. A una velocidad media de 50 km/h, el alcance máximo serían 75 km. Consultando con empresarios del sector, se indica que distancias superiores a 60 km son muy infrecuentes, aunque dependen de las comunicaciones disponibles. Se adoptan 15 km como distancia mínima y 30 km como la más probable. A diferencia de otros tipos de transporte, en los que el viaje de retorno del camión puede ser aprovechado para mover otro material, en el caso de las auto-hormigoneras resulta evidente que siempre regresan vacías, por lo que es necesario contabilizar tanto el trayecto de ida como el de vuelta. En la Tabla T7.13 se calculan la energía y emisiones correspondientes a los dos trayectos, para una cuba de 9 m³ de capacidad.

Distancia (km)	15	30	60
Energía (MJ/m ³)	52,742	105,483	210,967
Emisiones CO ₂ (kg/m ³)	3,964	7,929	15,857
Emisiones NO _x (g/m ³)	20,79	41,57	83,15
Emisiones CO (g/m ³)	4,72	9,44	18,89
Emisiones VOC (g/m ³)	1,20	2,39	4,79
Emisiones SO _x (g/m ³)	0,010	0,020	0,040
Emisiones PM ₁₀ (g/m ³)	0,59	1,17	2,34

Tabla T7.13.- Energía primaria y emisiones por m³ en transporte de hormigón fresco a diferentes distancias. Fuente: elaboración propia.

7.3.4.- Puesta en obra del hormigón

Los equipos a emplear para verter el hormigón y construir con él los diferentes tipos de elementos estructurales varían de una obra a otra, en función de las características y necesidades de ejecución. Para intentar disponer de un rango de valores medios, similar a los determinados en apartados anteriores, se ha optado por estudiar dos procesos que pueden aparecer en gran parte de las realizaciones en hormigón, como son el bombeo y el vibrado. Además, se considerará una cantidad adicional, calculada como un porcentaje sobre lo calculado para esas dos operaciones, como estimación de otras contribuciones no analizadas.

Para estimar los consumos y emisiones debidos al bombeo de hormigón se han empleado las características de una serie de bombas estacionarias convencionales del fabricante Schwing (2013), montadas sobre remolque y accionadas por motores diesel. Quedarían, en este aspecto, por debajo de las bombas de altas presiones empleadas en circunstancias especiales, y obviamente por encima de las obras en las que no se bombea hormigón. Las bombas seleccionadas y sus características se muestran en la Tabla T7.14.

Tipo	Producción (m ³ /h)	Potencia (kW)	Peso (kg)
SP305	23	36	1520
SP500	35	54	2495
SP750	54	75	3334
SP2800	101	129	5000

Tabla T7.14.- Características de bombas de hormigón estacionarias. Fuente: Schwing (2013).

Para este conjunto de equipos se han determinado sus consumos y emisiones principales de CO₂, a partir del consumo teórico indicado en la Tabla T7.1 (de 0,2 L de gasóleo por hora y kW) y de los factores de energía primaria y emisión de la Tabla T7.2. Además, resulta necesario añadir a ambos resultados un 15% adicional en concepto de consumos secundarios, de acuerdo con lo indicado en la Tabla T7.1. Por último, es preciso también valorar el impacto de la construcción de la máquina, basándose en el peso de la misma y en las consideraciones ya empleadas al hacer lo propio con las auto-hormigoneras en el apartado anterior, suponiendo que el 90% del peso es acero con la misma composición (60% primario y 40% reciclado), que la energía y emisiones asociados al acero suponen el 95% de los totales, y que la vida útil media de una bomba es de 5.100 horas, según SEOPAN (2008). En la Tabla T7.15 se muestran los resultados obtenidos para la estimación de consumo de energía primaria y emisiones de CO₂, para el bombeo de 1 m³ de hormigón en obra.

Tipo	Energía primaria específica (MJ/m ³)	Emisiones específicas (kgCO ₂ /m ³)
SP305	14,285	1,072
SP500	14,109	1,059
SP750	12,690	0,953
SP2800	11,636	0,873

Tabla T7.15.- Energía primaria y emisiones de CO₂ para el bombeo de 1 m³ de hormigón en obra. Fuente: elaboración propia.

El rango de valores de energía primaria está entre 11,64 y 14,30 MJ/m³, con una media de 13,18 MJ/m³. En emisiones de CO₂, los extremos son 0,87 y 1,07 kgCO₂/ m³, y la media 0,99 kgCO₂/ m³.

Para estudiar los equipos de vibrado se ha recurrido a documentación técnica de vibradores Dynpac (2013). En los vibradores de aguja se puede observar que la capacidad de vibración, en m³/h, depende del diámetro del vibrador, mientras que la potencia de los accionamientos (eléctricos o mecánicos) suele mantenerse constante para una familia de equipos. Se han seleccionado tres vibradores eléctricos y tres de gasolina, componiéndose cada terna con los dos extremos de la gama, de mayor y menor diámetro, más uno de tipo medio, como se muestra en la Tabla T7.16.

Tipo	Producción (m ³ /h)	Potencia (kW)	Peso (kg)
AT29	1,5	1,47 (eléctrico)	6,3
AT59	20	1,47 (eléctrico)	8,9
AN90	40	1,8 (eléctrico)	44,3
AA25	1,5	3 (gasolina)	23,9
AZ56	20	3 (gasolina)	25
AA77	35	3 (gasolina)	42

Tabla T7.16.- Características de vibradores de hormigón. Fuente: Dynapac (2013).

A partir de los datos anteriores se desarrolla un cálculo, bajo el mismo esquema indicado anteriormente para las bombas de hormigón, y cuyos resultados se presentan en la Tabla T7.17.

Tipo	Energía primaria específica (MJ/m ³)	Emisiones específicas (kgCO ₂ /m ³)
AT29	4,492	0,219
AT59	0,338	0,016
AN90	0,212	0,010
AA25	28,340	1,989
AZ56	2,126	0,149
AA77	1,218	0,086

Tabla T7.17.- Energía primaria y emisiones de CO₂ para el vibrado de 1 m³ de hormigón en obra. Fuente: elaboración propia.

En este caso existen grandes diferencias entre los vibradores eléctricos, más eficientes, y los de gasolina; es probable que existan también diferencias en cuanto al coste. Sin embargo, los equipos accionados por motor de explosión siguen siendo necesarios en obras en las que no se dispone de electricidad en las inmediaciones. Los vibradores de pequeño diámetro, empleados para pilares, piezas de sección reducida o elementos muy armados, tienen una capacidad muy escasa, y ello hace aumentar fuertemente sus consumos energéticos y sus emisiones. El rango total de energía primaria estaría entre los 28,3 MJ/m³ del vibrador de gasolina de 25 mm de diámetro y los 0,21 MJ/m³ para el vibrador de 90 mm accionado eléctricamente por un convertidor de frecuencia, siendo el valor medio de 14,25 MJ/m³. En emisiones de CO₂ el rango va de 0,010 a 1,99 kgCO₂/m³, con un valor medio de 1 kgCO₂/m³.

Los resultados de los cálculos para las gamas de equipos aludidas, determinadas con arreglo a lo aquí dicho, junto con los factores referidos en los Anejos 2 y 3 (véase la Tabla T7.2), se agrupan en las tablas T7-18 a T7.21.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Valor	Energía (MJ/ m ³)	Emisión CO ₂ (kg/m ³)	Emisión NO _x (g/m ³)	Emisión CO (g/m ³)	Emisión VOC (g/m ³)	Emisión SO _x (g/m ³)	Emisión PM ₁₀ (g/m ³)
Mínimo	11,64	0,87	4,091	2,03	0,423	0,004	0,417
Medio	13,18	0,99	4,634	2,30	0,479	0,005	0,472
Máximo	14,30	1,07	5,023	2,49	0,579	0,005	0,512

Tabla T7.18.- Energía primaria y emisiones contaminantes en el bombeo de 1 m³ de hormigón.

Valor	Energía (MJ/ m ³)	Emisión CO ₂ (kg/m ³)	Emisión NO _x (g/m ³)	Emisión CO (g/m ³)	Emisión VOC (g/m ³)	Emisión SO _x (g/m ³)	Emisión PM ₁₀ (g/m ³)
Mínimo	0,212	0,010	0,017	0,023	0,011	0,032	0,006
Medio	0,338	0,016	0,194	0,266	0,125	0,361	0,065
Máximo	4,492	0,219	0,370	0,509	0,240	0,691	0,125

Tabla T7.19.- Energía primaria y emisiones contaminantes en el vibrado de 1 m³ de hormigón, empleando vibradores eléctricos.

Valor	Energía (MJ/ m ³)	Emisión CO ₂ (kg/m ³)	Emisión NO _x (g/m ³)	Emisión CO (g/m ³)	Emisión VOC (g/m ³)	Emisión SO _x (g/m ³)	Emisión PM ₁₀ (g/m ³)
Mínimo	1,218	0,086	0,18	13,46	3,55	0,002	0,0018
Medio	2,126	0,149	2,17	162,4	42,87	0,003	0,0212
Máximo	28,34	1,989	4,15	311,3	82,19	0,050	0,0407

Tabla T7.20.- Energía primaria y emisiones contaminantes en el vibrado de 1 m³ de hormigón, empleando vibradores de gasolina.

Valor	Energía (MJ/ m ³)	Emisión CO ₂ (kg/m ³)	Emisión NO _x (g/m ³)	Emisión CO (g/m ³)	Emisión VOC (g/m ³)	Emisión SO _x (g/m ³)	Emisión PM ₁₀ (g/m ³)
Mínimo	0,715	0,048	0,0985	6,741	1,781	0,017	0,0039
Medio	1,232	0,0825	1,182	81,33	21,498	0,182	0,0431
Máximo	16,416	1,104	2,26	155,90	41,215	0,371	0,0829

Tabla T7.21.- Valores medios de energía primaria y emisiones contaminantes en el vibrado de 1 m³ de hormigón.

Por último, dentro de los cálculos anteriores cabría considerar otros procesos relacionados con la ejecución de estructuras de hormigón, que involucran utilización de maquinaria, consumos de recursos energéticos y emisiones contaminantes. Es el caso, por ejemplo, de la utilización de grúas,

equipos de fratasado, corte, o pulido, entre otros. Ante la creciente dificultad e imprecisión de estas estimaciones a medida que se profundiza dentro de la ejecución, se ha asumido que los procesos de puesta en obra estudiados (bombeo y vibrado) pueden suponer el 75% de los consumos y emisiones totales. De esta forma los valores totales de energía primaria y emisión de dióxido de carbono y otros contaminantes, por causa de la puesta en obra de 1 m³ de hormigón, quedarían como se indica en la Tabla T7.22.

Valor	Energía (MJ/ m ³)	Emisión CO ₂ (kg/m ³)	Emisión NO _x (g/m ³)	Emisión CO (g/m ³)	Emisión VOC (g/m ³)	Emisión SO _x (g/m ³)	Emisión PM ₁₀ (g/m ³)
Mínimo	16,47	1,224	5,586	11,695	2,939	0,028	0,561
Medio	19,22	1,430	7,755	111,51	29,302	0,249	0,687
Máximo	40,95	2,897	9,711	211,19	55,725	0,501	0,793

Tabla T7.22.- Valores mínimo, medio y máximo de energía y emisión de contaminantes por causa de la puesta en obra de 1 m³ de hormigón. Fuente: elaboración propia.

7.4 MODELO INTEGRAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN

Los resultados obtenidos en los capítulos 4, 5 y 6, junto con los reflejados en el epígrafe 7.3 del presente capítulo, permiten confeccionar un modelo completo, integral, para la estimación de consumos energéticos y emisiones contaminantes asociados a la construcción de una estructura de hormigón.

Teniendo en cuenta los procesos de cálculo seguidos en dichos tres capítulos y en el epígrafe 7.3 referido, el modelo que se crea se basa en un análisis de ciclo de vida, donde las fronteras del sistema se encuentran en la puesta en servicio de la estructura. Es decir, es un análisis de la cuna a la puerta, que no abarca sus impactos a lo largo de su vida útil ni durante el proceso de deconstrucción. No obstante, debe tenerse en cuenta que la parte del ciclo de vida que se ha considerado es la que supone la práctica totalidad de los impactos.

Las tablas T7.23 a T7.26 de este epígrafe 7.4, junto con la tabla T7.6 del epígrafe 7.3.1 del presente capítulo, relativa a aditivos, suponen la base del modelo planteado. Estas tablas recogen los valores medios de los resultados obtenidos en los trabajos resumidos en los capítulos 4, 5 y 6, así como los reflejados en el epígrafe 7.3 del presente capítulo.

Téngase en cuenta que en esta Tesis se han estimado también valores mínimos y máximos, que también pueden emplearse en el modelo, para obtener los oportunos extremos globales. Es decir, la información generada en esta Tesis ha permitido la creación de modelos probabilistas.

La dosificación y cuantía de armado del hormigón son las variables básicas del modelo. Adicionalmente, se pueden especificar las etapas de transporte cuya distancia sea conocida. En caso contrario estas distancias se pueden estimar en base lo ya comentado en los capítulos 4 al 7 con respecto a rangos habituales para las mismas.

Concepto	Energía (GJ/t)	Emisión CO ₂ (t/t)	Emisión NO _x (g/t)	Emisión CO (g/t)	Emisión VOC (g/t)	Emisión SO _x (g/t)	Emisión PM ₁₀ (g/t)
Producción de cemento	4,388	0,778	1402	1500	64,6	464,9	307,8
Producción de acero EAF	10,14	0,623	1009	538	269	608	139
Producción de áridos	0,034	0,0022	15,581	4,924	1,608	2,260	50,811
Preparación de ferralla	0,30	0,019	0,030	0,016	0,008	0,018	0,004

Tabla T7.23.- Valores medios estimados para el consumo de energía primaria y emisión de contaminantes en la producción de componentes del hormigón. Fuente: elaboración propia.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Concepto	Energía (MJ/m ³)	Emisión CO ₂ (kg/m ³)	Emisión NO _x (g/m ³)	Emisión CO (g/m ³)	Emisión VOC (g/m ³)	Emisión SO _x (g/m ³)	Emisión PM ₁₀ (g/m ³)
Procesado de hormigón en planta	9,38	0,455	0,770	1,058	0,498	1,436	0,259
Puesta en obra del hormigón	19,22	1,430	7,755	111,51	29,302	0,249	0,687

Tabla T7.24.- Valores medios estimados para el consumo de energía primaria y emisión de contaminantes en el procesado y puesta en obra del hormigón. Fuente: elaboración propia.

Concepto	Energía (MJ/t-km)	Emisión CO ₂ (kg/t-km)	Emisión NO _x (g/t-km)	Emisión CO (g/t-km)	Emisión VOC (g/t-km)	Emisión SO _x (g/t-km)	Emisión PM ₁₀ (g/t-km)
Transporte convencional por carretera	1,47	0,098	10,28	2,33	0,591	0,005	0,289
Transporte marítimo	0,20	0,019	4,8·10 ⁻⁴	4,48·10 ⁻⁵	1,63·10 ⁻⁵	1,21·10 ⁻⁴	3,75·10 ⁻⁵

Tabla T7.25.- Valores medios estimados para el consumo de energía primaria y emisión de contaminantes en el transporte de componentes del hormigón. Fuente: elaboración propia.

Concepto	Energía (MJ/m ³ ·km)	Emisión CO ₂ (kg/m ³ ·km)	Emisión NO _x (g/m ³ ·km)	Emisión CO (g/m ³ ·km)	Emisión VOC (g/m ³ ·km)	Emisión SO _x (g/m ³ ·km)	Emisión PM ₁₀ (g/m ³ ·km)
Transporte hormigón fresco	1,758	0,132	1,385	0,315	0,080	0,0007	0,0390

Tabla T7.26.- Valores medios estimados para el consumo de energía primaria y emisión de contaminantes en el transporte hormigón fresco. Fuente: elaboración propia.

Partiendo, bien de las Tablas T7.6 y T7.23 a T7.26, para calcular valores medios, bien de las tablas completas que se han incluido en los capítulos 4 al 7, para estimar también los extremos mínimo y máximo, se describe a continuación el modelo de cálculo para un parámetro genérico de consumo de energía o emisiones contaminantes.

Los datos de partida para el cálculo son los correspondientes a la dosificación del hormigón (cantidades de cemento, áridos, agua y aditivos), armado de la estructura (cantidad de acero), y distancias reales o estimada para el transporte de cada componente. La fórmula de dicho modelo es la siguiente:

$$P_i = \sum_j F_{ij} \cdot m_j + \sum_j F_{ijt} \cdot m_j \cdot d_j + F_{iht} \cdot m_h + F_{iht} \cdot m_h \cdot d_h + F_{io} \cdot m_h \quad [E7.1]$$

Donde P_i es uno de los siete parámetros tratados en esta tesis, relacionados con impactos al medio, siendo i el tipo de factor según lo reflejado en la Tabla T7.27. Por tanto, P₁ es el consumo de energía, P₂ las emisiones de CO₂, y así sucesivamente.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

P_i	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$
Parámetro i	Energía	CO ₂	NO _x	CO	VOC	SO _x	PM ₁₀

Tabla T7.27.- Designación de subíndices del parámetro genérico P_i para la aplicación del modelo de cálculo reflejado en [E.7.1].

Por otro lado, en [E7.1] se identifican con el subíndice j los componentes del hormigón, de acuerdo con las tablas T7.28 y T7.29. En función de ello, m_j son las cantidades (masas) de cada componente empleadas en la dosificación (cemento, cero, áridos, aditivos), y d_j son las distancias de transporte asociadas a cada uno de dichos componentes.

m_j	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = n$
Masa componente j	Cemento	Acero	Áridos	Aditivo 1	Aditivo n

Tabla T7.28.- Designación de subíndices de componentes para la aplicación del modelo de cálculo.

d_j	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = n$
Distancia transporte componente j	Tte. cemento a planta	Tte. acero a ferralla y de ferralla a obra	Tte. áridos a planta	Tte. aditivo 1 a planta	Tte. aditivo n a planta

Tabla T7.29.- Designación de subíndices de transportes para la aplicación del modelo de cálculo.

Por su parte, el subíndice h empleado en [E7.1] identifica al hormigón preparado, de forma que m_h es la cantidad (masa) de hormigón fresco, y d_h la distancia de transporte del hormigón fresco.

En otro orden de cosas, en [E7.1] F_{ij} son los factores de cálculo asociados a cada componente j (cemento, acero, áridos, aditivos), para el parámetro P_i . Para calcular valores medios, los F_{ij} se tomarán de las tablas T7.23 y T7.6. Para calcular valores mínimos y máximos se emplearán las tablas análogas, con estimaciones triples, que se han ido generando en los capítulos 4 al 7.

Por otro lado, en [E7.1] F_{ijt} designa al factor correspondiente al transporte de cada componente j (cemento, acero, áridos, aditivos), para el parámetro P_i ; F_{iht} al del procesado del hormigón en planta; F_{iht} al del transporte de hormigón fresco; y F_{io} al de la puesta en obra del hormigón.

Respectivamente, para obtener valores medios, se emplearán los datos de la Tabla T7.8 para F_{ijt} ; los de la Tabla T7.5 para F_{iht} ; los de la Tabla T7.12 para F_{iht} a; y los de la Tabla T7.22 para F_{io} . Como siempre, esta Tesis incluye también valores mínimos y máximos de estos últimos parámetros, con objeto de estimar valores extremos de P_i .

En el capítulo 9 se desarrollará un caso práctico empleando este modelo, detallando los datos de partida y factores empleados.

7.5 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En la primera parte de este capítulo (epígrafe 7.3) se han estimado los consumos de energía y las emisiones contaminantes asociados a la preparación y ejecución del hormigón. Los resultados son del mismo tipo que los de los capítulos anteriores, estimándose los mismos parámetros. En este caso se ha hecho en base a información diferente, por no existir en este sub-sector estadísticas de tipo alguno relacionadas con el trabajo aquí resumido.

En este capítulo se han incluido también el consumo de energía y emisiones contaminantes de los aditivos incorporados al hormigón, no habiendo un capítulo específico para estos componentes.

Además de la habitual revisión de la literatura existente, que no registraba estudios para España con el mismo alcance que aquí se ha empleado, con la salvedad de los aditivos, que ya habían sido estudiados de una manera similar por Roncero (2011), se ha recopilado información técnica de fabricantes de equipos, se han realizado diversas visitas y se han mantenido entrevistas con expertos del sector.

Los resultados obtenidos se resumen en las tablas T7.5, T7.6, T7.8 a T7.10, T7.12, y T7.18 a T7.22. De nuevo, los resultados de este capítulo, junto con los oportunos resultados de los cálculos de los impactos del transporte que se realizan en el Anejo 3 de esta Tesis, han formado parte del estudio ambiental del ciclo de vida del hormigón que se aborda en el Capítulo 9.

Con respecto a esta primera parte del capítulo (epígrafe 7.3), los resultados obtenidos sirven para mejorar el primer análisis que se hizo con motivo de esta Tesis, que fue motivo de una publicación en revista indexada (Mel et al., 2013). Hasta aquel momento no había sido posible acceder a cierta información, y para dicha publicación se tomaron como valores de referencia de consumo de energía y emisiones de CO₂ las cifras de 9,99 MJ/m³ y 0,97 kgCO₂/m³ para la producción de hormigón en planta, y de 121,6 MJ/m³ y 9,0 kgCO₂/m³ para la puesta en obra. Estos factores procedían de la reelaboración de los indicados en Flower y Sanjayan (2007), para adaptarlos a las características del sistema eléctrico español. Los resultados obtenidos ahora, y reflejados en este capítulo, son similares para las plantas de hormigón, especialmente en cuanto a la energía consumida, y notablemente inferiores en cuanto a la puesta en obra.

En Mel et al. (2013), los procesos de transporte suponían de media 259,95 MJ/m³ y 47,49 kgCO₂/m³. Mientras que el valor energético era similar, aunque inferior, a los estimados en este capítulo, las emisiones estimadas con los presentes cálculos resultan claramente inferiores a las estimadas en Mel et al. (2013). Para dicha publicación los factores para el transporte ordinario por carretera se tomaron de Venkatarama y Jagadish (2003), mientras que los empleados en el transporte de hormigón se tomaron de Goggins et al. (2010). Se considera que los cálculos reflejados en este capítulo se ajustan mejor a la realidad española.

Por otro lado, en la segunda parte de este capítulo (epígrafe 7.4) se ha establecido un modelo completo, integral, para la estimación de consumos energéticos y emisiones contaminantes asociados a la construcción de una estructura de hormigón, del tipo ACV (análisis del ciclo de vida) ambiental, de la cuna a la puerta. Este modelo se ha empleado más adelante en esta Tesis, para poder cumplir los objetivos que se habían planteado para ella. En particular, ha servido para una parte importante del análisis crítico del Anejo 13 de la EHE-08, y para establecer los pesos del ramal

ambiental del nuevo modelo de sostenibilidad integral que se ha desarrollado, que no está basado en el ACV (pero sí en los resultados del mismo), y que se incluye en el Capítulo 10 de esta Tesis.

Con respecto a la utilización del modelo de cálculo reflejado en el epígrafe 7.4 de este capítulo, pueden señalarse tres aspectos importantes:

- Aun tratándose de un modelo conceptualmente muy sencillo, la cantidad de operaciones a realizar, en especial si se desea trabajar con las ternas de valores (mínimo, medio y máximo) ofrecidas para cada parámetro en capítulos y epígrafes anteriores, hace aconsejable la utilización de medios informáticos, aunque sólo sea una hoja de cálculo. Ello permitirá la obtención inmediata de resultados introduciendo las variables de partida (dosificación, armado y distancias de transporte).
- Este modelo puede ser modificado para obtener una mayor representatividad de los resultados, en caso de disponer de información de partida más detallada o precisa que la que se ha generado aquí. Esto forma parte de los posibles desarrollos posteriores. Un caso claro de ello sería la posibilidad de disponer de datos acerca del cemento realmente empleado en la obra, en cuanto a su contenido en clinker y en adiciones. Esto permitiría afinar los parámetros referidos al cemento (energía y emisiones) siguiendo el proceso de cálculo expuesto en el Capítulo 4 (en el capítulo 9 se desarrollará un ejemplo en este sentido). Entre las posibles modificaciones o mejoras podría estar también la introducción de transportes marítimos o ferroviarios en algún componente, en caso de existir.
- En el Capítulo 10 se presenta, dentro del nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad integral (ambiental, social y económica) desarrollado en esta Tesis, un grupo de indicadores numéricos complementarios a los índices de contribución de la estructura a la sostenibilidad. Los parámetros ambientales de dicho grupo de indicadores (consumo energético y emisión de CO₂) se podrán obtener por aplicación directa del presente modelo.

CAPÍTULO 8: ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES DE BASE RELATIVAS A ASPECTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES

CAPÍTULO 8: ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES DE BASE RELATIVAS A ASPECTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES

8.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos 4 a 7 se han expuesto los estudios de tipo análisis del ciclo de vida (ACV) realizados en torno a los aspectos ambientales de la sostenibilidad de las estructuras de hormigón. Por un lado, ello ha sido una de las bases del análisis crítico de Anejo 13 de la EHE-08, que se ha resumido en el Capítulo 9. Por otro, los resultados de dicho ACV han servido también para el posterior desarrollo de la parte ambiental del nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad incluido en el Capítulo 10, que no está basado en el ACV.

El presente capítulo se ocupa del estudio de los dos pilares restantes de la sostenibilidad, el económico y el social. Ambos han recibido menos atención en el Anejo 13 y en otros estudios sobre sostenibilidad que los aspectos ambientales. Esto ha sido así hasta el punto de que, con frecuencia, se emplea el término sostenibilidad únicamente para referirse a su vertiente ambiental. Es posible que esto se deba a que los aspectos económicos, por una parte, suelen estar ya profusamente estudiados y analizados en una economía de mercado altamente competitiva. Por otra, a que los aspectos sociales están todavía en fase de definición precisa y de desarrollo de metodologías de evaluación de los mismos (Labuschagne y Brent, 2006; Jorgensen et al., 2008; Dreyer et al., 2006; Dempsey et al., 2009; McKenzie, 2004; Assefa et al., 2007; Henry y Kato, 2011).

Los análisis que se mostrarán en los epígrafes siguientes tienen la intención de identificar y definir los aspectos o elementos que pueden o deben ser incluidos en una evaluación de la sostenibilidad de una estructura de hormigón. También tratan de reflexionar sobre la ponderación o importancia relativa de dichos aspectos. Las conclusiones extraídas han servido de base para el desarrollo de los capítulos 9 y 10.

8.2 METODOLOGÍA

Dada la naturaleza de los aspectos a estudiar en este capítulo, la metodología a emplear ha sido diferente para cada uno de ellos, apartándose del tipo de estudios técnicos realizados en los capítulos anteriores. Partiendo del análisis de referencias bibliográficas, se presentan los razonamientos que han determinado la configuración del nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad resumido en el Capítulo 10.

Para estudiar la vertiente económica, en el epígrafe 8.3 se tienen en cuenta los costes definidos en un ACV económico, de forma coherente con los análisis realizados sobre aspectos ambientales. Por otro lado, en dicho epígrafe se analiza el papel fundamental que juega la durabilidad de la estructura, especialmente en el Anejo 13 de la EHE. Se reflexiona acerca de la oportunidad de incluir otros factores adicionales en la evaluación de la sostenibilidad económica, así como de la conveniencia de matizar y desarrollar la propia evaluación de la durabilidad. Además de las consultas bibliográficas, se han tenido en cuenta diversas conversaciones mantenidas con profesionales del sector.

En cuanto al estudio de los aspectos sociales, en base al análisis de la literatura existente, en el epígrafe 8.4 se identifican los diferentes grupos sociales que intervienen en el proceso de creación de una estructura de hormigón. Como veremos en el epígrafe siguiente, hay un acuerdo general con respecto a que uno de los aspectos sociales de mayor importancia en estos momentos es la generación de empleo. Por ello se ha decidido estimar el orden de magnitud de la contribución al volumen total de mano de obra de cada uno de los procesos que concurren en la estructura. Esto permite establecer la importancia relativa de cada actor en el análisis global de la sostenibilidad social.

8.3 ANÁLISIS DE ASPECTOS ECONÓMICOS

8.3.1.- Introducción

García et al. (2015) afirman que el análisis de costes del ciclo de vida “opone una visión a largo plazo frente a la perspectiva tradicional que aspira a la obtención de una rentabilidad inmediata con una mínima inversión inicial, ignorando sus efectos económicos y medioambientales futuros”. Relacionado estrechamente con el análisis ambiental del ciclo de vida, ya comentado en capítulos anteriores, en este caso se trata de evaluar la relación coste / beneficio y el rendimiento económico a lo largo de toda la vida de la estructura. La norma ISO 15686-5 (ISO, 2008) define la metodología para llevar a cabo un análisis de este tipo en construcciones.

8.3.2.- Costes en el ciclo de vida

Al margen de los aspectos tradicionalmente económicos, como son el cálculo de ratios de rentabilidad, inversión o rendimiento, difícilmente aplicables a este caso, para los fines propuestos en este capítulo resulta interesante la definición de las fases del ciclo de vida de una estructura que se realiza en la ISO 15686-5, y los costes a ellas asociados.

Dicha norma define las fases de proyecto / diseño, construcción, operación y mantenimiento, y por último el final de la vida útil: demolición y restitución del entorno, u otras alternativas. La vida útil o período de servicio de la estructura define el intervalo temporal durante el cual se amortiza la inversión.

Gjorv (2009) aporta la expresión E8.1 como base para el estudio de los costes de ciclo de vida de una estructura de hormigón, en un plazo de t_N años:

$$LCC(t_N) = C_I + C_{QA} + \sum_{i=1}^{t_N} \frac{C_{IN}(t_i) + C_M(t_i) + C_R(t_i) + \sum_{LS=1}^M P_{fLS}(t_i) \cdot C_{fLS}}{(1+r)^{t_i}} \quad [E8.1]$$

Donde:

N = número de años del período de estudio.

i = índice correspondiente al ordinal del año, desde el primero (i=1) hasta el final del período de estudio (i=N)

t_i = año i-ésimo del período de estudio

$LCC(t_N)$ = Coste de Ciclo de Vida (*Life Cycle Cost*) acumulado hasta el año t_N

C_I = costes de diseño y construcción (implantación o implementación)

C_{QA} = costes de aseguramiento y control de calidad

$C_{IN}(t_i)$ = costes esperados de inspecciones para el año t_i

$C_M(t_i)$ = costes esperados de mantenimiento para el año t_i

$C_R(t_i)$ = costes esperados de reparaciones para el año t_i

M = número de estados límite de la estructura (*Limit States*; LS)

LS = índice correspondiente a cada estado límite de la estructura (LS=1 a M)

$p_{fLS}(t_i)$ = probabilidad de fallo asociado al estado límite LS, en el año t_i

C_{fLS} = coste asociado a la ocurrencia del fallo correspondiente al estado límite LS

r = tasa de interés

Los costes de diseño, o proyecto, suelen depender de la entidad del mismo. En España los honorarios de los profesionales que intervienen en la elaboración de proyectos y dirección facultativa de las obras (Arquitectos, Aparejadores y Arquitectos Técnicos, Ingenieros, Ingenieros Técnicos) estuvieron, en su momento, regulados oficialmente a través de los Colegios Profesionales correspondientes. Así, por ejemplo, el RD 2512/1977 (Ministerio de Vivienda, 1977) aprobaba las tarifas para los trabajos desarrollados por Arquitectos. Con la aprobación de la Ley 7/1997, de medidas liberalizadoras en materia de suelo y Colegios Profesionales (Jefatura del Estado, 1997), los baremos de honorarios pasaron a ser orientativos, suprimiéndose su obligatoriedad. Finalmente, la Ley 25/2009 (Jefatura del Estado, 2009) prohibió a los Colegios Profesionales el establecimiento de honorarios orientativos o de regulaciones en este sentido, quedando este campo completamente liberalizado. En general estos honorarios suelen corresponder con un porcentaje del presupuesto de ejecución material (PEM) del proyecto. Para ilustrar su relevancia, a modo de ejemplo, en la Tabla T8.1 se incluyen costes extraídos de una tarifa de una empresa española de arquitectura e ingeniería, correspondientes al año 2011 (AB Ingeniería, 2011). Similares son los honorarios orientativos estipulados en 2003 por el Consejo Gallego de Ingenieros Técnicos Industriales de Galicia (CGITIG, 2003), que oscilan entre el 4% y el 6% del PEM, según el tipo de obra, y que indican que los costes de dirección de obra serían análogos a los de redacción del proyecto, mientras que los honorarios de coordinación de seguridad y salud se situarían en el entorno del 3%.

Tipo de obra	Coste de redacción del proyecto (% sobre el presupuesto de ejecución material)
Obras hidráulicas, canales, riegos, acueductos	2,65 – 5,00 %
Carreteras y ferrocarriles	3,00 – 5,00 %
Estructuras para cubiertas, muros, depósitos, silos	4,00 %
Edificación, garajes, instalaciones deportivas	4,00 %
Naves industriales	3,00 %
Cimentaciones	6,00 %
Estructuras especiales, túneles, inyecciones, obras subterráneas	5,00 – 6,00 %
Puertos, diques, muelles, pantalanés	3,50 – 4,00 %

Tabla T8.1. Tarifas de honorarios de redacción de proyectos de una empresa de ingeniería civil. Fuente: AB Ingeniería (2011).

Los costes de construcción representan la parte más importante de la inversión, y dependen fuertemente del tipo de estructura, clase de exposición, materiales empleados y numerosos factores adicionales. No es objeto de este capítulo, ni de la evaluación de la sostenibilidad económica, el determinar cuándo una estructura es “cara”, “económica” o “económicamente eficiente”. Las posibles comparaciones a efectos de sostenibilidad deberían hacerse teniendo en cuenta el ciclo de vida. Para su comparación con los restantes costes de [E8.1], se presentan en la Tabla T8.2 costes por m³ de diferentes tipos de elementos estructurales, tomados del Generador de Precios incluido en la versión 2015.f del paquete informático CYPE Ingenieros (CYPE, 2015).

Tipo de elemento estructural	Coste unitario de ejecución material
Pilar rectangular HA-25/B/20/IIa, cuantía de armado 120 kg acero / m ³ , encofrado metálico, vertido con cubilote.	466,58 €/m ³
Viga descolgada HA-25/B/20/IIa, cuantía de armado 150 kg acero / m ³ , encofrado de madera, vertido con bomba.	398,28 €/m ³
Losa maciza de HA-25/B/20/IIa, canto 24 cm, cuantía de armado 22 kg acero / m ³ , encofrado continuo, vertido con cubilote.	78,96 €/m ²
Muro de HA-25/B/20/IIa, espesor 30 cm, cuantía de armado 50 kg acero / m ³ , encofrado metálico a dos caras, vertido con bomba.	302,55 €/m ³
Zapata de HA-25/B/20/IIa, cuantía de armado 50 kg acero / m ³ , vertido desde camión.	149,76 €/m ³

Tabla T8.2: Costes unitarios de ejecución material de diferentes tipos de elementos estructurales. Fuente: CYPE (2015).

El control de calidad de la obra puede implicar la realización de ensayos, tal y como refleja la EHE en su Capítulo XVI, definiendo características y tamaños de las muestras a inspeccionar. A efectos orientativos se aportan en la Tabla T8.3 los costes de tres tipos de ensayo típicos, extraídos de CYPE (2015).

Tipo de ensayo	Coste unitario de ejecución material
Ensayo de características mecánicas de aceros corrugados (barras / mallas): resistencia a la tracción, límite elástico, alargamiento de rotura, doblado /desdoblado	55,55 €/unidad
Ensayo de consistencia de hormigón fresco mediante cono Abrahams + ensayo de resistencia de hormigón endurecido con rotura de dos probetas	76,00 €/unidad
Ensayo de penetración de agua bajo presión según UNE EN 12390-8	355,91 €/unidad

Tabla T8.3: Costes unitarios de diferentes ensayos de control de calidad de elementos estructurales. Fuente: CYPE (2015).

Los costes de utilización y mantenimiento en estructuras de hormigón suelen ser bajos, tal y como se argumenta en ocasiones en favor de la sostenibilidad de esta opción estructural (Ashley y Lemay, 2008), al no requerir la protección que sí necesitan las estructuras de acero y de madera, que deben inspeccionarse y mantenerse mediante operaciones a realizar cada pocos años. La Tabla T8.4 recoge los costes de mantenimiento durante el primer decenio de vida correspondientes a los elementos citados en T8.2, tomados de la misma fuente anterior (CYPE, 2015).

Tipo de elemento estructural	Coste unitario de mantenimiento en los primeros diez años
Pilar rectangular HA-25/B/20/IIa, cuantía de armado 120 kg acero / m ³ , encofrado metálico, vertido con cubilote.	23,33 €/m ³ .decenio
Viga descolgada HA-25/B/20/IIa, cuantía de armado 150 kg acero / m ³ , encofrado de madera, vertido con bomba.	27,88 €/m ³ .decenio
Losa maciza de HA-25/B/20/IIa, canto 24 cm, cuantía de armado 22 kg acero / m ³ , encofrado continuo, vertido con cubilote.	3,95 €/ m ² .decenio
Muro de HA-25/B/20/IIa, espesor 30 cm, cuantía de armado 50 kg acero / m ³ , encofrado metálico a dos caras, vertido con bomba.	12,10 €/m ³ .decenio
Zapata de HA-25/B/20/IIa, cuantía de armado 50 kg acero / m ³ , vertido desde camión.	4,49 €/m ³ .decenio

Tabla T8.4: Costes unitarios de mantenimiento de diferentes tipos de elementos estructurales durante su primer decenio de vida. Fuente: CYPE (2015).

A falta de información más detallada acerca de los costes de inspección, podrá considerarse ésta como parte integrante de los mantenimientos periódicos a realizar, y por lo tanto incluidos sus costes en los expresados en la Tabla T8.4.

Las operaciones de mantenimiento son acciones de índole preventiva y de pequeño alcance, destinadas a evitar el menoscabo de la estructura (del Río, 2008). Por su parte, las reparaciones persiguen restituir el nivel de seguridad inicial de una estructura que ha sufrido un daño. Entre las operaciones de mantenimiento habituales se encuentran, por ejemplo, la reparación de pequeñas fisuras y la limpieza y pintura de los elementos estructurales expuestos. Las reparaciones tienden a ser actuaciones de mayor entidad y coste más elevado, menos frecuentes, por lo general realizadas cuando ya ha transcurrido una parte importante de la vida útil de la construcción, y que resultan en un incremento significativo de la fiabilidad de la estructura (Frangopol et al., 1997). Como indica Yepes (2015), es muy frecuente que las operaciones de mantenimiento preventivo en construcción sean

escasas, lo que conduce a la necesidad de abordar los problemas estructurales cuando ya se han detectado deterioros importantes que pueden requerir una reparación costosa y de gran alcance.

Por todo lo dicho, no resulta fácil estimar, con carácter general, el orden de magnitud de los costes de reparación. Puede establecerse como límite superior el no superar los costes de demolición y reconstrucción, ya que en ese caso la reparación carecería de sentido económico. Por otra parte, se puede considerar que dichos costes se mantendrían en un nivel bajo si las operaciones de inspección y mantenimiento preventivo estuviesen bien definidas y se realizasen adecuadamente a lo largo de la vida útil de la estructura.

Igualmente, resulta complicado estimar las probabilidades de fallo asociadas a cada estado límite. En una estructura correctamente diseñada, ejecutada y mantenida, éstas deberían mantenerse en un nivel muy bajo durante su vida útil. Precisamente uno de los factores que marcan el final de la misma es la pérdida de seguridad estructural, o lo que es lo mismo, la aparición de una elevada probabilidad de fallo.

Finalmente, dentro de los costes del fallo de la estructura cabe mencionar los costes de demolición, prácticamente presentes siempre que existen deterioros estructurales graves. En casos en los que la vida útil de una construcción ha llegado a su final por motivos no relacionados con su estructura, cuestión que se tratará en detalle en el epígrafe siguiente, el destino final puede ser la rehabilitación.

En la Tabla T8.5 se recogen los costes de demolición de varios elementos estructurales, tomados de CYPE (2015). Como se puede observar, la demolición supone un coste importante con respecto a los costes de construcción de los mismos elementos, por encima del 50% (véase la Tabla T8.2). No obstante, debe señalarse que estos costes están referidos a la demolición por medios manuales o mecánicos de elementos aislados. Los costes de demolición integral de un edificio mediante maquinaria pesada o voladura controlada deberían ser bastante menores.

Tipo de elemento estructural	Coste unitario de demolición (ejecución material)
Demolición de pilares o vigas de hormigón armado	256,53 €/m ³
Demolición de muro de hormigón armado	131,68 €/m ³
Demolición de losa de hormigón armado	36,25 €/ m ²
Demolición de zapata de hormigón armado	268,60 €/m ³

Tabla T8.5: Costes unitarios de demolición de diferentes tipos de elementos estructurales. Fuente: CYPE (2015).

Para el estudio comparativo de diferentes opciones de proyecto, programas de mantenimiento o reparaciones, puede resultar más útil referir los costes señalados anteriormente a una base anual, de forma que queden patentes las ventajas de un diseño o mantenimiento orientados al incremento del período de servicio de la estructura. Se define así el coste anual equivalente de la estructura (Gjorv, 2009):

$$C_A(t_N) = \sum_{j=1}^N \frac{p_f(t_j) \cdot [C_1 + C_{QA} + C_{IN}(t_j) + C_M(t_j) + C_R(t_j)]}{1 - (1+r)^{-t_j}} \quad [E8.2]$$

Donde todas las variables tienen el mismo significado que en [E8.1], excepto las siguientes:

$C_A(t_N)$ = Coste Anual Equivalente (CAE) de la estructura durante el periodo de vida de N años

j = índice correspondiente al ordinal del año, desde el primero (i=1) hasta el final del período bajo estudio (i=N)

t_j = año j-ésimo del período bajo estudio

$p_r(t_j)$ = probabilidad de fallo en el año j-ésimo

Mediante el análisis de los costes anuales equivalentes asociados a una estructura, queda de manifiesto cómo el incremento de la vida útil de la misma incide en la disminución del citado coste anual. Sin embargo, para obtener incrementos significativos de esta vida útil puede ser necesario incrementar los costes de diseño, ejecución y mantenimiento, existiendo por tanto una solución óptima desde el punto de vista económico. Gjorv (2009) incluye un ejemplo en este sentido, que se expone en el epígrafe siguiente para ilustrar la relevancia de la durabilidad sobre la sostenibilidad económica del hormigón.

8.3.3.- Importancia de la durabilidad

La EHE-08 define la durabilidad de una estructura de hormigón como *“su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis estructural. Una estructura durable debe conseguirse con una estrategia capaz de considerar todos los posibles factores de degradación y actuar consecuentemente sobre cada una de las fases de proyecto, ejecución y uso de la estructura”*.

Asimismo, define la vida útil de la estructura como el *“período de tiempo, a partir de la fecha en la que finaliza su ejecución, durante el que debe mantenerse el cumplimiento de las exigencias. Durante ese período requerirá una conservación normal, que no implique operaciones de rehabilitación. La vida útil nominal depende del tipo de estructura y debe ser fijada por la Propiedad previamente al inicio del proyecto”*.

La Tabla 5.1 de la EHE-08, reproducida aquí en la Tabla T8.6, establece la vida útil mínima para diferentes estructuras o partes de ellas.

Tipo de estructura	Vida útil nominal
Estructuras de carácter temporal	Entre 3 y 10 años
Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal	Entre 10 y 25 años
Edificios (o instalaciones) agrícolas o industriales y obras marítimas	Entre 15 y 50 años
Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media	50 años
Edificios de carácter monumental o de importancia especial	100 años
Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	100 años

Tabla T8.6: Vida útil nominal para diferentes tipos de estructura, según EHE-08.

Dado el concepto de coste anual equivalente definido en el apartado anterior se entiende que, siempre que la estructura cumpla las exigencias para las que fue proyectada, cuantos más años de servicio se consideren dentro de su vida útil, menor será el resultado de repartir el coste total del ciclo de vida entre todas las anualidades. Por cierto, que también será mejor a efectos ambientales, porque se tarda más tiempo en volver a dañar el planeta, construyendo una nueva estructura, o realizando operaciones de reparación o rehabilitación cuyo impacto sobre el planeta también es importante.

Las opciones para incrementar la durabilidad de una estructura son múltiples y variadas. Se ha hablado sobre ellas en el Capítulo 2, resumiendo numerosas consultas bibliográficas, y se volverá de nuevo sobre ellas en el Capítulo 10. En general, las actuaciones de mayor nivel son las empleadas en condiciones de especial agresividad o en las que se necesita una fiabilidad elevada de la estructura. Estas actuaciones requieren también inversiones adicionales relevantes, con respecto a la que supondría una estructura convencional en entornos no agresivos.

Para ilustrar la relación entre durabilidad, opciones de ejecución y coste anual equivalente, se toma de Gjørv (2009) el ejemplo que se resume a continuación. Se trata de una estructura marítima de hormigón armado situada en el puerto noruego de Trondheim, formada por un tablero (entramado de vigas principales y secundarias) sostenido por pilares, que recibe las cargas mecánicas de dos grúas de gran tonelaje que circulan sobre raíles por su superficie. Tras un periodo en servicio de 38 años, la estructura mostraba un nivel de deterioro elevado, debido principalmente a la corrosión del acero, que limitaba su vida útil, como plataforma de carga, a un período de tiempo muy corto. Se estudiaron diferentes alternativas estructurales, de modo teórico, que hubieran permitido incrementar la durabilidad en caso de haberse diseñado y ejecutado en su momento. Se resume el caso de estudio en la Tabla T8.7.

Opción estructural	Vida útil adicional	% LCC	Coste anual equivalente
Estructura original	0 años	100,00	66.666,67 €
Incremento de la resistencia del hormigón, de 45 a 70 MPa	+ 10 años	101,50	52.910,05 €
Incremento del recubrimiento en vigas, de 75 a 100 mm	+ 10 años	100,20	52.910,05 €
Incremento de la resistencia (45 a 70 MPa) y del recubrimiento (de 75 a 100 mm)	+ 25 años	102,30	40.211,64 €
Empleo de acero inoxidable en el 75% de las armaduras de vigas principales y secundarias.	> + 40 años	112,10	< 37.037,04 €
Empleo de acero inoxidable en el 100% de las armaduras de vigas principales y secundarias.	> + 40 años	116,10	< 40.211,64 €
Instalación de un sistema de protección catódica	+ 15 años	112,00	< 57.142,86 €

Tabla T8.7: Resumen del caso práctico analizado en Gjørv (2009).

Como se puede observar en dicha tabla, aunque todas las opciones para mejorar la durabilidad implican un incremento del coste total del ciclo de vida (% LCC), los costes anuales equivalentes disminuyen en todos los casos, debido al incremento de la vida útil. En este caso, la opción de emplear un 75% de armaduras de acero inoxidable resulta la que acarrea menores costes anuales, con una disminución del 45% sobre la alternativa de referencia, a costa de un incremento del coste total de un 12,1%.

De esta forma queda de manifiesto la relevancia de la durabilidad dentro del desempeño económico de una estructura, cuando a dicha estructura se le requiere un periodo de servicio lo más prolongado posible. Se plantea ahora la cuestión de determinar las concurrencias de factores externos que pueden hacer que esta extensión de la vida útil no resulte, en la práctica, económicamente eficiente.

8.3.4.- Vida útil y obsolescencia de las estructuras

Siguiendo la definición de durabilidad de la EHE, la vida útil de una estructura de hormigón habría llegado a su fin cuando la degradación del material haya alcanzado un nivel tal que ya no sea posible garantizar el cumplimiento de las funciones requeridas. Dado que esta Instrucción se refiere únicamente a aspectos estructurales, las funciones a las que alude son las exigencias expresadas en el Artículo 5 de la EHE-08: resistencia, estabilidad, aptitud al servicio, y comportamiento frente al fuego. Existen modelos físico-matemáticos de diferente alcance y complejidad para la predicción de la vida de una determinada estructura, en función sus características y de la agresividad del ambiente en la que se ubicará (Sanjuán, 1992; Glasser et al., 2008; Folic, 2009; Narasimhan y Chew, 2009; D'Andréa, 2010; entre otros). En el Anejo 9 de la EHE-08 se incluye un modelo sencillo de previsión de vida útil basado en el análisis del comportamiento frente a la corrosión por cloruros.

Sin embargo, la vida útil de una estructura puede llegar antes que el agotamiento de los materiales, debido a otros condicionantes relacionados con la construcción de la que forma parte, sea un edificio o una infraestructura. Según Moser (1999), además de las propiedades relacionadas con la seguridad, dentro de las cuales estarían las exigencias mencionadas en la anterior definición de durabilidad, existen también grupos de propiedades de carácter funcional y estético que pueden marcar el final del periodo de servicio de una construcción. Las propiedades relacionadas con la

seguridad resultan cruciales y su cumplimiento está estipulado en normativas y códigos de diseño. Por el contrario, los aspectos funcionales y estéticos pueden ser evaluados de una forma diferente por la propiedad u otros agentes. Cualquiera de los tres grupos de propiedades pueden marcar el fin del período de servicio, en el momento en que su nivel de cumplimiento baje del umbral mínimo establecido. La Figura F8.1, tomada de Moser, 1999, ilustra un caso en el que, si bien las condiciones de seguridad de un edificio se mantienen por encima del nivel mínimo exigible, el deterioro de su apariencia resulta la propiedad condicionante para el final de su vida útil.

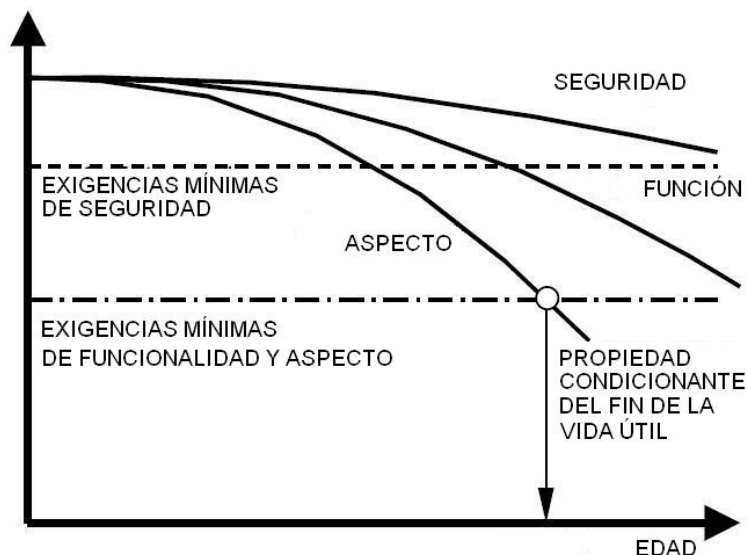


Figura F8.1: Evolución temporal del grado de cumplimiento de exigencias en un edificio. Fuente: Moser (1999), traducción propia.

La revista Informes de la Construcción, editada por el Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), ha dedicado en 2015 un monográfico a la obsolescencia de las viviendas sociales construidas en España entre la posguerra y la década de 1970. En los trabajos incluidos en dicha publicación se incide en la influencia de factores arquitectónicos y tecnológicos causantes de que muchas de esas construcciones se encuentren ya al final de su vida útil, independientemente de sus condiciones estructurales. Ejemplos de factores arquitectónicos son los cambios sociales, de modelo de familia y de modos de habitar (García Vázquez, 2015). Ejemplos de factores tecnológicos son las bajas prestaciones de los sistemas de aislamiento térmico y acústico empleados en la época de construcción de estos edificios (Kurtz et al, 2015). Esta obsolescencia afectaría a edificios construidos incluso hace menos de 40 años. El mercado de la construcción está tratando de reaccionar ante estos problemas, por ejemplo con los denominados Sistemas de Aislamiento Térmico por el Exterior (SATE). Estos sistemas permiten mejorar la capacidad aislante de esas fachadas de bajas prestaciones, mediante operaciones de rehabilitación que también suelen incluir el cambio de ventanales. Sin embargo, no siempre se abordan este tipo de obras, por diversas razones económico-financieras o de gestión (falta de acuerdo), entre otras.

Las consideraciones anteriores obligan a una reflexión en torno al modo de tratar la durabilidad en un análisis de la sostenibilidad de una estructura: ¿tiene la durabilidad la misma importancia en cualquier tipo de estructura?; ¿una estructura diseñada para alcanzar una durabilidad elevada es siempre más sostenible que otra cuya vida útil sea menor?

Como se ha visto, el período en servicio real de una estructura depende las circunstancias de la construcción de la que forma parte, que puede quedar fuera de uso por causas no estructurales. Se

ha comentado ya el caso de edificaciones residenciales obsoletas, aun cuando no presenten problemas estructurales relevantes, y se puede señalar también el caso de numerosas instalaciones industriales en las que el ciclo de vida de los equipos de proceso resulta notablemente más corto que la vida útil esperada de las estructuras de hormigón que las soportan o albergan.

Por otra parte, un esfuerzo en incrementar la vida útil suele implicar un aumento de los costes iniciales de construcción, como se observa en la Tabla T8.7. Este incremento del coste total a lo largo del ciclo de vida es rentable en términos de coste anual equivalente, siempre y cuando la estructura permanezca en servicio hasta su agotamiento.

En el ejemplo de Gjørv (2009) incluido en el epígrafe anterior (8.3.3) se observa que, para ese caso concreto, la opción de sustituir parcialmente las armaduras convencionales por armaduras de acero inoxidable incrementa el coste total en un 12,1% pero, al implicar un incremento de vida útil por encima de los 40 años, hace disminuir el coste anual hasta casi la mitad de la opción inicial de referencia. Ahora bien, si la estructura hubiese dejado de ser útil antes de ese periodo de tiempo, que en este caso estaría en torno a 80 años, el coste anual habría resultado mayor. En un caso extremo en el que el periodo en servicio se acortase drásticamente por causas ajenas a la estructura, el montante adicional invertido en incrementar su durabilidad no hubiera tenido sentido, y no habría contribuido a que la estructura fuese más sostenible desde el punto de vista económico, al margen de que también podría aumentar el impacto medioambiental de la construcción, al usarse más materiales, o materiales más sofisticados que pudieran suponer incrementos de consumo de energía y recursos.

En este sentido, observemos las estructuras indicadas en las tres primeras filas de la Tabla T8.6, extraída de la EHE-08; se trata de estructuras temporales, elementos reemplazables que no forman parte de una estructura principal, y estructuras o instalaciones agrícolas y similares. Se establece para ellas una vida útil mínima reducida, entre 3 y 50 años. En principio tendría menos objeto aplicar esfuerzos adicionales a incrementar la durabilidad de estas estructuras, salvo que en proyecto se defina una vida útil por encima de lo estipulado en la tabla anterior. En el otro extremo de dicha tabla, los edificios de carácter monumental y las grandes infraestructuras deben ser diseñados para alcanzar, como mínimo, un siglo de vida, y por tanto sí resulta necesario dotarlos de una mayor protección frente al paso del tiempo.

Muy similar es la clasificación de estructuras en función de su vida útil según el Eurocódigo (AENOR, 2003), que se muestra en la Tabla T8.8.

Tipo de estructura	Vida útil de cálculo
Estructuras temporales	10 años
Partes reemplazables de estructuras	10 - 50 años
Estructuras agrícolas y similares	15 - 30 años
Estructuras de edificios y otras estructuras comunes	50 años
Estructuras de edificios monumentales, puentes, y otras estructuras de ingeniería civil	100 años

Tabla T8.8: Vida útil de cálculo para diferentes tipos de estructura, según Eurocódigo. Fuente: AENOR (2003).

Resumiendo las reflexiones anteriores, podría decirse que la mejora de la durabilidad de una estructura es un factor importante a la hora de evaluar la sostenibilidad, siempre que dicha estructura tenga, en efecto, previsión de alcanzar un periodo de servicio prolongado. Por contra, no resultaría un aspecto clave en construcciones con un período de vida corto, e incluso pudiera ser contraproducente. Como indica Mackay (2009), a la hora de diseñar una construcción es importante que el cliente establezca sus requisitos de durabilidad, en caso de ser superiores a los mínimos estipulados por la normativa, ya que no tiene sentido utilizar materiales muy durables en una construcción de corta vida de servicio, a menos que fuese desmontable y reutilizable.

8.3.5.- Factores que afectan a la durabilidad

Conseguir que una estructura alcance o exceda la vida útil para la que fue diseñada depende de múltiples factores. Mackay (2009) cita como principales los relacionados con:

- El diseño y la especificación técnica, que incluirían la selección de componentes, la elección de la estrategia de durabilidad a seguir, la definición de las condiciones de uso y la planificación de la vida útil.
- La construcción, contemplando tanto los procesos de ejecución como la recepción y almacenaje de materiales y los posibles daños accidentales durante esta fase.
- Y el mantenimiento (revestimientos, impermeabilidad, limpieza, etc.) y eventuales reparaciones.

Los principales agentes agresivos sobre el hormigón son (García et al., 2010):

- Acciones mecánicas, como sobrecargas excesivas, impactos o vibraciones.
- Acciones físicas, como variaciones de temperatura, acumulación de hielo, presencia de corrientes eléctricas vagabundas, erosión por abrasión o por cavitación, o acción del fuego.
- Acciones biológicas, relacionadas con hongos, bacterias, algas y musgos, que pueden causar retención de agua y propiciar ataques mecánicos o químicos.
- Acciones químicas, debidas a ataques por ácidos, álcalis o sulfatos.

Los ataques más importantes y que han generado mayor número de medidas protectoras son los químicos, y en particular la corrosión de las armaduras debida a la presencia de cloruros u otros ácidos.

En EHE-08 se vincula la estrategia de durabilidad a las condiciones ambientales a las que estará expuesta la estructura (Artículo 37.1.1), por medio de las clases de exposición. Es evidente que, a mayor agresividad del medio, mayor alcance deberán tener las medidas adoptadas para garantizar la durabilidad, y mayor efectividad se debe obtener de ellas. Por el contrario, las medidas diseñadas para entornos severos tendrán poco sentido en ambientes poco agresivos, tanto en cuanto a lo técnico como a lo económico. Las estrategias de durabilidad propuestas por la EHE-08 y las principales medidas protectoras empleadas en la actualidad se han expuesto brevemente en el

Capítulo 2, existiendo una muy abundante bibliografía acerca de ellas (López et al., 1991; Polder, 1996; Osborne, 1999; Wheat, 2002; Almusallam, 2003; Alonso et al., 2007; Al-Assadi et al., 2008; Molina, 2008; Söylev y Richardson, 2008; El-Hawary y Abdul-Jallel, 2010; Fernández, 2010; Garcés et al., 2010; Vaquero, 2010; Burón et al., 2011; Medina et al., 2011; Aponte et al., 2012; Zheng et al., 2012; entre otros).

8.3.6.- Reutilización y reaprovechamiento de las estructuras

Se han tratado hasta ahora las cuestiones de la durabilidad y la vida útil de las estructuras, indicándose que, para conseguir una mayor sostenibilidad económica de una estructura, esforzarse en la prolongación del periodo de servicio por medio de estrategias adecuadas de mejora de la durabilidad tiene sentido cuando previsiblemente será el agotamiento de la propia estructura (o de parte de sus elementos) el que marque el fin de la vida útil de la construcción.

La siguiente reflexión necesaria es la que corresponde al caso contrario al planteado: ¿qué se puede evaluar, desde el pilar económico de la sostenibilidad, en una estructura en la que ya, de partida, se considera una vida de utilización muy inferior a la que cabría esperar de los elementos que la forman, aún sin adopción de medidas protectoras especiales?. En otras palabras, ¿qué se puede valorar cuando la durabilidad de la estructura, ejecutada con arreglo a mínimos, va a ser mayor que su ciclo de vida, por razones externas a la propia estructura?. Ejemplos de lo anterior podrían ser una estructura vinculada a una construcción temporal, destinada a realizar un servicio durante un periodo determinado de 3 a 5 años, o una estructura que forme parte de una instalación industrial para la que se estima una vida útil de 20 años, tras los cuales procedería el desmantelamiento y la eventual sustitución del conjunto.

En un extremo de este tipo de situaciones, y por mucho que estas circunstancias se produzcan muy pocas veces, se hace notar que a veces una estructura puede quedar obsoleta antes de su uso. Esto puede suceder en casos muy especiales, cuando hay tecnologías de la información interrelacionadas con la estructura. Un ejemplo de ello son las estructuras que soportaban los denominados “mímicos” de las salas de control de redes eléctricas de muy alta tensión. En un caso real (del Caño, 2016), al comienzo de las obras de dos centros de control de este tipo de redes, a principios de la década de los 90 del siglo XX, la tecnología que se preveía emplear en estas salas, de doble altura y gran superficie en planta, implicaba el uso de grandes paneles mímicos que reflejaban el estado general de la red, incluyendo aspectos de producción de energía, líneas de transporte, y subestaciones. El control se ejercía a distancia, de manera indirecta, por medio de llamadas telefónicas a los responsables de centrales y subestaciones. Los paneles estaban formados por una gran cantidad de elementos modulares cableados por detrás del panel. Todo ello suponía un gran peso y se necesitaba una estructura de apoyo, que se proyectó en acero, para conseguir la mayor flexibilidad posible frente a futuros cambios, que ya se preveían. Las estaciones de trabajo de aquellos sistemas necesitaban estar en una sala con condiciones especiales de climatización. Algunos equipos informáticos recibían aire frío por su parte inferior, con lo cual había que llevar conductos de aire acondicionado por el falso suelo. Sin ser muy dilatados, los dos proyectos comentados no fueron cortos, y la tecnología que finalmente se empleó en los mímicos fue otra, basada en pantallas convencionales de visión, de peso mucho más reducido, con equipos informáticos que no necesitaban condiciones especiales de refrigeración. Además, algunas actividades de control se podían hacer de forma automática, o bien de forma directa, desde la sala de control. Las estructuras

de apoyo ya no tenían que soportar mucho peso, y las que se habían construido eran a todas luces excesivas para las nuevas necesidades; en realidad, ya no eran estrictamente necesarias.

Al margen de estos posibles casos excepcionales, existen muchos casos en los cuales la durabilidad de la estructura, ejecutada con arreglo a mínimos, va a ser mayor que su ciclo de vida. Como se ha anticipado, en ellos el coste anual equivalente de la estructura sería elevado debido al reducido periodo de tiempo durante el que se repartirían los costes totales, y carecería de objeto incrementar los costes iniciales para favorecer la durabilidad. Sin embargo, este tipo de estructuras podrían no estar abocadas a la demolición prematura si es posible adaptarlas a un nuevo uso, que permita aprovechar su vida residual y con ello prolongar su periodo en servicio. En este sentido, puede tener sentido evaluar la capacidad de una estructura para dicha adaptación.

La idea anterior puede resultar difícil de llevar a la práctica, debido a los múltiples factores que concurrirían en este tipo de situaciones y a las grandes incertidumbres en torno al desarrollo de acontecimientos futuros; no solo habría que tener en cuenta si la estructura sería capaz de asumir otra función, sino también si efectivamente existirían necesidades a cubrir por la estructura en cuestión. La valoración de un diseño versátil, o fácilmente adaptable a un cambio de uso, puede resultar intuitiva, pero es difícil de describir en términos objetivos y válidos para cualquiera de los tipos estructurales contemplados en la EHE. Existen múltiples ejemplos de construcciones cuyo diseño las haría inservibles para cualquier otra función diferente de la que fueron concebidas.

De todas formas, muchas naves industriales convencionales, normalmente diáfanos, son susceptibles de la versatilidad indicada anteriormente, ya que fácilmente podrían albergar muchos usos alternativos al inicialmente previsto. De hecho, sobre todo en periodos de bonanza, tradicionalmente ha habido un mercado inmobiliario de naves industriales para su venta a clientes de diferentes sectores o subsectores, proyectadas y construidas antes de conocerse a su comprador, por mucho que se hubieran realizado los oportunos estudios de mercado.

Más allá de la versatilidad ya aludida, sí es posible valorar dos características relacionadas con la reutilización:

- Que la estructura sea fácilmente ampliable o modificable, como sucede a menudo en naves industriales, que se diseñan con pórticos testeros que podrían pasar a ser centrales en caso de ampliación longitudinal.
- Que la estructura, o parte de ella, sea desmontable y trasladable a una nueva ubicación. Esto puede hacerse de forma relativamente fácil con estructuras metálicas o de madera. Con hormigón es más complicado, aunque una prefabricación con un concepto suficientemente previsor podría aportar cierta versatilidad.

Dentro de este ámbito puede encuadrarse también la rehabilitación de edificaciones residenciales, industriales o terciarias, con objeto de actualizar y modificar sus usos originales, sea con actuación sobre su estructura, o sin ella. En sendas entrevistas al respecto, mantenidas con dos arquitectos en ejercicio, se ha planteado que la política de demolición y reconstrucción prematura ha estado ligada a la especulación, con factores como la recalificación del terreno, el precio del suelo y la evolución urbana, y que dicha política ha contribuido a la denominada "burbuja inmobiliaria", no siendo ya la tendencia actual (Varela, 2015), aunque pudiera repetirse en el futuro. De este modo, rehabilitar equivale a no incrementar innecesariamente el parque inmobiliario, duplicando costes de

conservación y mantenimiento. Barros (2015) considera que en la actualidad no es frecuente que en un edificio residencial con gran cantidad de propietarios, llegue a existir el consenso suficiente como para vender el edificio completo a un promotor, con vistas a su demolición y reconstrucción. En cambio, en edificios públicos o terciarios puede darse con más facilidad el caso de un final de vida útil prematuro, ya que estos edificios suelen pertenecer a un único propietario (administración o empresas) que, en muchas ocasiones, tienen la capacidad económica suficiente para asumir la demolición y reconstrucción.

Con objeto de estimar qué tipos de edificios serán más susceptibles de querer ser conservados en el futuro, más allá de la vida para la que fueron diseñados, Varela (2015) introduce como factor decisivo el concepto de “valor arquitectónico”, según el cual edificios con relevancia basada en su estilo o estética, en sus sistemas constructivos, en aspectos urbanísticos o históricos, en su capacidad de atracción del turismo y de generación de entradas económicas para la ciudad, o en el hecho de haber sido concebido por autores de gran importancia (edificios de autor), entre otros aspectos, serían merecedores de ser conservados y perpetuarse a lo largo del tiempo, incluso durante muchas generaciones. Este es el caso de la Torre Eiffel, en estructura metálica, y de determinadas obras de hormigón proyectadas por Freyssinet, Torroja, Nervi o Candela, a pesar de que muchas de ellas han desaparecido. El legado patrimonial supera cualquier tasación económica, y hoy en día ha aumentado la sensibilidad de la sociedad en cuanto al conocimiento del patrimonio y el respeto y valoración de lo existente.

Cabe esperar, como tendencia futura, un incremento de las rehabilitaciones de edificios. Según Ludevid (2015), el número de nuevas viviendas construidas en España ha disminuido drásticamente (en torno al 90%) entre 2006, año del máximo histórico, y 2012. Por su lado, las rehabilitaciones se han mantenido prácticamente constantes en este periodo. La Ley 8/2013 de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas (Jefatura del Estado, 2013) pretende reorientar el sector inmobiliario y de la construcción en este sentido.

8.4 ANÁLISIS DE ASPECTOS SOCIALES

8.4.1.- Introducción

Tal y como se ha adelantado en el Capítulo 2, los aspectos sociales de la sostenibilidad resultan relativamente más difíciles de concretar que los ambientales o económicos, a la hora de realizar un análisis de alternativas concretas para un producto o proceso determinados. Este es el caso de la ingeniería de la construcción, y en particular de la construcción de una estructura de hormigón. En algunos aspectos lo más difícil es obtener datos fiables; a veces ni siquiera es posible obtener datos, como se verá más adelante.

Hay una parte de los criterios mencionados en la literatura existente, y reseñados anteriormente en el Capítulo 2, que tienen más que ver con la evaluación de políticas institucionales o con proyectos de desarrollo (Montalvo, 2002), que con el tipo de modelo que se pretende desarrollar en la presente Tesis, o con modelos de tipo ACV social aplicados a productos. Sin embargo, algunos de los criterios o indicadores comentados en dicho capítulo sí resultan adecuados para su uso en este tipo de modelos, y por ello han sido trasladados directamente al modelo planteado en el Capítulo 10.

Por su parte, el actual Anejo 13 de la EHE incluye en su formulación algunos aspectos sociales, que serán discutidos en el Capítulo 9, algunos de los cuales también son oportunos para un modelo de evaluación de la sostenibilidad de hormigones estructurales. Por ello, también han sido empleados aquí.

Aun así, hay un aspecto clave sobre el cual todavía hay que profundizar más, para enfocar de modo adecuado el estudio de la sostenibilidad social de estructuras de hormigón. Se trata del empleo. Para un mejor desarrollo del modelo aportado en esta Tesis, se incluye en este capítulo el estudio de tres aspectos clave:

- (i) el papel de la generación de empleo como aspecto fundamental, vertebrador del resto de criterios sociales,
- (ii) la identificación de los diferentes actores o partes interesadas que intervienen en el sector objeto de este trabajo,
- y (iii) el establecimiento de una jerarquización de la relevancia de cada una de las partes identificadas, en función del empleo generado por cada una de ellas.

8.4.2.- El desempleo como problema social

En el Capítulo 2 se ha identificado la desigualdad de ingresos como uno de los factores primordiales a la hora de generar situaciones socialmente desfavorables, así como un aspecto clave en las condiciones de vida de una parte muy grande de los habitantes del planeta, tanto en lo referido a la cobertura de necesidades básicas como de otro tipo. Las consideraciones expuestas en dicho capítulo tienen un carácter general y son, en gran parte, aplicables a estudios de alcance internacional como el de Ortiz y Matthew (2012), siendo válidos para la comparación de tipo

macroeconómico entre países y regiones, incidiendo en las diferencias entre los países desarrollados y los países en desarrollo.

Bajando el alcance del análisis a un contexto nacional, dentro de España, sería posible asociar las desigualdades económicas y sociales a diferentes variables, entre las cuales una muy destacada sería la existencia o no de ingresos provenientes del empleo. El nivel de dichos ingresos y la estabilidad del empleo pueden definir bastante bien si una persona o familia se encuentran en una situación socialmente precaria, o no. Según estudios recientes (Goerlich, 2016), en los últimos años la desigualdad se ha incrementado en España, principalmente por efecto del mercado de trabajo. Las consecuencias de la crisis económica han incidido más en las rentas más modestas, incrementándose el grupo de españoles con niveles de inferiores al 75% de la mediana, a costa de la disminución de las clases medias. La población está preocupada por ello (CIS, 2016), y diversos medios de comunicación han publicado noticias al respecto (entre otros, El País, 2016), estimando que la renta real disponible por persona en nuestro país ha disminuido en un 11% entre 2007 y 2013, y que España ocupa actualmente el quinto puesto de Europa en índice de desigualdad, por detrás de Letonia, Lituania, Rumania y Bulgaria. Este último dato es muy revelador, pues si bien de forma habitual deben observarse con cautela las informaciones procedentes de los medios de comunicación, generalmente vinculados a grupos e intereses empresariales, políticos y económicos, en este caso todos los medios han publicado análisis con resultados parecidos (que, por otro lado, son coherentes con diversos estudios realizados por autores independientes y de mayor fiabilidad, ya citados en el Capítulo 2).

Tradicionalmente el desempleo ha sido una de las principales preocupaciones de los españoles, según muestran las encuestas periódicas del Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS, 2016). En mayo de 2016, un 75% de los encuestados consideraba el paro como uno de los tres principales problemas de España, cifra que estaba por encima del 90% a finales de la década de 1980 y principios de 1990. Únicamente en los años de mayor bonanza económica dicha preocupación experimentó una relativa disminución, situándose en torno al 50% en 2005 y llegando a bajar del 40% en 2007, para iniciar una rápida remontada a partir del estallido de la crisis económica internacional en 2008.

La Encuesta de Población Activa correspondiente al cuarto trimestre de 2015 (INE, 2016) recoge un número total de desempleados de 4.779.500 personas, con una tasa del 20,90%. El reparto es casi paritario entre hombres y mujeres. Con una población activa del orden de 24 millones de personas, tener una cantidad cercana los 5 millones de desempleados es un problema muy importante, y más si se tiene en cuenta que el desempleo se reparte de forma heterogénea por la geografía española, habiendo algunas poblaciones en las cuales la tasa de paro es muy superior al 20%. Si en España no ha habido más conflictos por estas causas, probablemente se debe, por un lado, a la activación de las redes familiares que sustentan a los más desfavorecidos y, por otro, a la economía sumergida. En todo caso, hay una parte de esa economía sumergida que resulta forzada, ya que las entradas económicas que muchas personas obtienen de esta forma no les permiten pagar todos los impuestos y costes fijos asociados a un autónomo.

8.4.3.- Partes que intervienen en la construcción de una estructura de hormigón

Henry y Kato (2011) indican que existe una corriente sociológica, denominada modelo SCOT (Social Construction of Technology), que considera como principal impulsor del desarrollo tecnológico la

interacción entre grupos sociales relevantes, antes que otros factores como la demanda del mercado. Estos grupos relevantes o partes interesadas son aquellos que, estando todos implicados en el producto final, poseen cada uno de ellos su propia perspectiva en cuanto a la identificación de problemas y soluciones en el proceso. El desarrollo avanza a medida que las partes interesadas definen y negocian los problemas y soluciones, de cara a un objetivo común de producto, siguiendo un proceso no lineal que puede incluir complejas interacciones sociales.

Dichos autores identifican cuatro grupos sociales vinculados a la producción de estructuras sostenibles: (i) fabricantes, (ii) contratistas, (iii) propietarios, y (iv) el entorno académico. Fuera ya de la mera producción, también tienen influencia en este campo los propietarios y los técnicos que proyectan las estructuras y supervisan su construcción. En todo caso, a efectos de creación de empleo por metro cúbico de hormigón, los que más empleo generan son las empresas del sector en su conjunto, a distancia del empleo que puedan generar la universidad y los propietarios.

Los fabricantes son los proveedores tanto de componentes como del propio hormigón, estando este grupo subdividido según el tipo de producto considerado. Los técnicos y contratistas tienen un papel claro en todo el proceso, pudiendo existir diferentes niveles de contratación o subcontratación. Relacionado con ello, hay técnicos y contratistas generalistas y otros que están especializados en un determinado campo. Los propietarios pueden incluir diferentes subgrupos: instituciones u organismos públicos, empresas y particulares. Por su parte, el entorno académico es el responsable de aportar capacidad de formación, investigación y consultoría a los anteriores. Los puntos de vista de cada grupo, tanto en general como en lo referente a la sostenibilidad del producto final (la estructura) están condicionados por su papel en el proceso y por sus conocimientos y experiencias previos.

Durante el desarrollo de la presente Tesis se ha realizado un estudio pormenorizado del sector del hormigón, principalmente al hilo de los trabajos necesarios para el estudio de los factores ambientales. Dicho estudio se ha resumido en los capítulos 2, 4, 5, 6 y 7. Como fruto de este análisis se establece la clasificación de partes interesadas que se expone a continuación, que será empleada en el modelo de evaluación de aspectos sociales.

De los cinco grupos principales que se han anticipado, esta clasificación se centra más en los fabricantes y contratistas. El propietario, cliente o usuario, así como el técnico, a los cuales no se les niega en ningún caso la relevancia dentro del desempeño sostenible de la estructura, sólo aparecen reflejados en algún aspecto muy concreto del modelo de evaluación, debido a que dicho modelo es una herramienta para que, entre otras cosas, ellos puedan realizar comparaciones y decidir el empleo de una determinada alternativa estructural en detrimento de otra. Por otra parte, una parte del mundo académico está continuamente trabajando en el campo de la sostenibilidad, y tratando de que los resultados de su trabajo se transfieran a la vida profesional. Sin embargo, salvo en el caso de los contratos de colaboración con empresas para transferencia inmediata de resultados de investigación, o bien en los casos de publicaciones y patentes ya realizadas, que sirvan de forma inmediata para los propósitos actuales del empresario, el resto de los trabajos del entorno académico son procesos a medio y largo plazo que se salen del alcance de un modelo como el aquí generado; en consecuencia, el modelo desarrollado sólo tiene en cuenta el entorno académico para algún aspecto particular.

Resumiendo todo lo dicho: con unos procesos, tecnologías y productos concretos, existentes hoy en día, unos más sostenibles, y otros con menor contribución al desarrollo sostenible, son los fabricantes y contratistas los que más pueden influir en el nivel de sostenibilidad social de la estructura, generando empleo. El técnico y el propietario comparan y eligen, y el mundo académico colabora por

medio de las herramientas habituales de transferencia de resultados de investigación, y trabaja para el futuro. En otro orden de cosas, volviendo a la parte medioambiental, la mayoría del consumo de energía y de las emisiones contaminantes se producen durante el trabajo de fabricantes y contratistas. En consecuencia, no ha sido necesario acometer un estudio en profundidad acerca del papel del resto de participantes en la sostenibilidad estructural.

En función de todo lo comentado, y una vez analizadas las diferentes subdivisiones de los grupos, se establecen los siguientes grupos o tipos de actores principales en el proceso estudiado:

- (i) Fabricantes de productos primarios o componentes del hormigón: cemento, acero, áridos, y aditivos.

- (ii) Fabricantes de productos intermedios: hormigón preparado, armaduras, y elementos prefabricados.

- (iii) Empresas constructoras y contratistas.

Existe además un cuarto grupo, transversal, que sería el formado por las empresas de transporte, que comunican entre sí a los tres anteriores.

Los aspectos o criterios a evaluar dentro de la parte social del modelo resultarán de aplicación a cada grupo. Existen también aspectos, como se ha indicado, vinculados a otros actores que no se han considerado aquí como principales (no incluidos en esta clasificación principal). El modo de ponderar la contribución de cada grupo o actor al resultado final se realizará, como se indica en el epígrafe siguiente, por medio de su contribución al volumen de mano de obra generado.

8.4.4.- La generación de empleo en el sector del hormigón

En base a lo expuesto en epígrafes anteriores, se asume el nivel de empleo como aspecto social más relevante, al menos en las circunstancias actuales de España y de muchos otros países. A continuación se va a estimar el volumen de mano de obra generado en cada uno de los procesos de fabricación y construcción que se han identificado, calculando el empleo total que se genera por m³ de estructura. Ello servirá para establecer la importancia del papel de cada grupo o actor participante en la construcción de la estructura, en el contexto del modelo de evaluación de la sostenibilidad que se presentará en el Capítulo 10.

Para ello se analizan datos de empleo directo correspondientes a la producción de cemento, acero y áridos; a la preparación de hormigón en planta; a la elaboración de ferralla; y a la ejecución de la estructura.

Las fuentes consultadas han sido diversas, si bien se necesitaría disponer de información más detallada para obtener una estimación más exacta o fidedigna. De todos modos, la intención de este cálculo es simplemente estimar el orden de magnitud de la contribución de cada elemento al nivel de empleo conjunto del sector, sin pretensión de servir para otras finalidades, ya que el modelo generado en el Capítulo 10 no es del tipo ACV.

Se asume como hipótesis de cálculo un volumen de trabajo de 1770 horas anuales por trabajador. Esta cantidad es variable en función de los diferentes convenios colectivos y también se vería afectada por la existencia de contratos temporales o a tiempo parcial.

En primer lugar, con respecto a la **producción de cemento**, en la Tabla T8.9 se presentan los correspondientes datos, tomados del Informe de Responsabilidad Social Empresarial 2014 de la Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (Fundación CEMA, 2015).

Año	Producción total cemento	Empleo directo	Nº total horas trabajadas	Horas / kg cemento
2014	20.119.506 t	4.139 empleados	7.326.030 horas	0,000364

Tabla T8.9: Producción y empleo en la fabricación de cemento en España. Fuente: Fundación CEMA (2015).

En cuanto a la **producción de acero**, para estimar sus correspondientes parámetros se han tomado datos procedentes de la patronal del sector (UNESID, 2015) correspondientes a los años 2005-2014, recogidos en la Tabla T8.10. Estos datos se refieren al conjunto del sector, y por tanto no son específicos de la fabricación de acero en plantas EAF destinado a la elaboración de corrugados. El valor medio de la última columna es 0,00228 horas de trabajo / kg acero.

Año	Producción total acero	Empleo directo	Nº total horas trabajadas	Horas / kg acero
2005	17.904.000 t	21.366 empleados	37.817.820 horas	0,00211
2006	18.401.000 t	21.078 empleados	37.308.060 horas	0,00203
2007	18.999.000 t	21.210 empleados	37.541.700 horas	0,00198
2008	18.640.000 t	21.374 empleados	37.831.980 horas	0,00203
2009	14.362.000 t	21.288 empleados	37.679.760 horas	0,00262
2010	16.342.000 t	21.622 empleados	38.270.940 horas	0,00234
2011	15.556.000 t	20.960 empleados	37.099.200 horas	0,00238
2012	13.639.000 t	20.165 empleados	35.692.050 horas	0,00262
2013	14.252.000 t	18.832 empleados	33.332.640 horas	0,00234
2014	14.249.000 t	18.908 empleados	33.467.160 horas	0,00235

Tabla T8.10: Producción y empleo en la fabricación de acero en España. Fuente: UNESID (2015).

La **producción de áridos** se estudió en el Capítulo 6, gracias a la información directa proporcionada por una empresa del sector, cuya identificación no se realiza, por motivos de confidencialidad. Los datos proporcionados incluían las producciones horarias de una decena de canteras, a partir de las cuales se ha elaborado la Tabla T8.11. La media total de todos los valores es de 0,0000919 horas de trabajo / kg de árido.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Año	2010	2011	2012
Cantera 1	0,0000812 horas / kg	0,0000710 horas / kg	0,0001357 horas / kg
Cantera 2	0,0000832 horas / kg	0,0000836 horas / kg	0,0000623 horas / kg
Cantera 3	0,0000719 horas / kg	0,0000770 horas / kg	0,0001086 horas / kg
Cantera 4	0,0000750 horas / kg	0,0001074 horas / kg	N.D.
Cantera 5	0,0000486 horas / kg	0,0000741 horas / kg	0,0001755 horas / kg
Cantera 6	0,0000707 horas / kg	0,0000752 horas / kg	0,0000784 horas / kg
Cantera 7	0,0000900 horas / kg	0,0000939 horas / kg	0,0002289 horas / kg
Cantera 8	0,0000707 horas / kg	0,0000844 horas / kg	0,0000766 horas / kg
Cantera 9	N.D.	0,0000666 horas / kg	0,0000934 horas / kg
Cantera 10	0,0000882 horas / kg	0,0001088 horas / kg	N.D.

Tabla T8.11: Horas de trabajo por kg de árido producido en canteras graníticas del norte de España. Fuente: Comunicación personal (2014).

Con respecto a las **plantas de hormigón preparado**, se trata de instalaciones que necesitan pocos empleados. En las que se ha visitado, un número muy reducido de personas realizan todo el trabajo; normalmente, una o dos personas. Su funcionamiento ha venido condicionado por las circunstancias económicas de los últimos años, en las que el marcado descenso del consumo de hormigón (ANEFHOP, 2013) ha provocado el cierre de numerosas plantas, y el trabajo de muchas otras por debajo de su capacidad máxima.

En lo relativo a estas plantas, por un lado, el CEDEX (2007d) ha publicado datos de producción anteriores a la crisis económica, correspondientes al año 2006. A partir de ellos, para determinar el número total de horas trabajadas se ha estimado que cada planta cuenta con una media de dos empleados, de acuerdo con lo observado en las visitas realizadas y con lo comentado en las entrevistas mantenidas. Los resultados se reflejan en la Tabla T8.12.

Por otro lado, en base a la información obtenida tras una visita realizada en 2016 a una planta de este tipo (Armacon, 2016), se han estimado las productividades recogidas en la Tabla T8.13. Como se puede observar, el número de empleados es muy reducido, y aumenta en función del volumen de hormigón demandado. Los datos en la Tabla T8.13 resultan coherentes con los de la Tabla T8.12. El promedio de los tres casos presentados resulta ser de 0,0902 horas de trabajo por m³ de hormigón preparado.

Año	Producción total hormigón	Nº de plantas	Nº total horas trabajadas	Horas / m ³ hormigón
2006	97.761.000 m ³	2.262 plantas	8.007.480 horas	0,0819 horas / m ³

Tabla T8.12: Horas de trabajo por m³ de hormigón preparado. Fuente: elaboración propia a partir de datos de CEDEX (2007d) y de datos reales de canteras.

Producción total hormigón	Nº de empleados	Nº total horas trabajadas	Horas / m ³ hormigón
Hasta 15.000 m ³	1 empleado	1.770 horas	0,118 horas / m ³
Hasta 50.000 m ³	2 empleados	3.540 horas	0,0708 horas / m ³

Tabla T8.13: Horas de trabajo por m³ de hormigón preparado. Fuente: Armacon (2016).

En otro orden de cosas, debido a su entidad, es necesario considerar también el **transporte del hormigón fresco**. Según los datos estimados en el Capítulo 7, se puede considerar un volumen transportado por cuba de 9 m³ y un tiempo aproximado de 2 horas por viaje, incluyendo la ida, el vertido y el retorno a la planta para iniciar un nuevo ciclo; el resultado de dicha estimación sería de 0,222 horas de trabajo por m³ de hormigón transportado. En realidad este valor debe considerarse como un mínimo, ya que se vería muy condicionado por las circunstancias y necesidades de cada obra, donde puede ser frecuente transportar cantidades de hormigón inferiores al máximo permitido para el vehículo. Con un volumen transportado de 5 m³, la relación anterior ascendería a 0,400 horas de trabajo por m³ de hormigón transportado.

Volumen hormigón transportado	Tiempo total viaje	Horas / m ³ hormigón
5 m ³	2 horas	0,400 horas / m ³
9 m ³	2 horas	0,222 horas / m ³

Tabla T8.14: Horas de trabajo por m³ de hormigón transportado.

Para la **elaboración de armaduras de acero**, ante la imposibilidad de obtener una estimación directa de la repercusión de la mano de obra en su procesado, se ha recurrido a la base de precios del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Guadalajara (COAATGU, 2013). En la descomposición de la partida de elaboración y montaje de armaduras de acero corrugado, dicha fuente estima que resultan necesarias 0,024 horas de trabajo por kg de acero.

Cabe estudiar también los procesos de **ejecución de las estructuras** en obra. Su estimación se basa de nuevo en la información aportada por CYPE (2015), habiéndose realizado de forma análoga a cómo fueron estimados los costes unitarios de cada elemento estructural reflejados en la Tabla T8.2. Los resultados de esas estimaciones se incluyen en la Tabla T8.15. El promedio de los valores recogidos en dicha Tabla es de 1,68 horas de trabajo por m³ de elemento estructural.

Tipo de elemento estructural	Mano de obra
Pilar rectangular HA-25/B/20/IIa, cuantía de armado 120 kg acero / m ³ , encofrado metálico, vertido con cubilote.	0,72 horas / m ³
Viga descolgada HA-25/B/20/IIa, cuantía de armado 150 kg acero / m ³ , encofrado de madera, vertido con bomba.	1,64 horas / m ³
Losa maciza de HA-25/B/20/IIa, canto 24 cm, cuantía de armado 22 kg acero / m ³ , encofrado continuo, vertido con cubilote.	4,83 horas / m ³
Muro de HA-25/B/20/IIa, espesor 30 cm, cuantía de armado 50 kg acero / m ³ , encofrado metálico a dos caras, vertido con bomba.	0,644 horas / m ³
Zapata de HA-25/B/20/IIa, cuantía de armado 50 kg acero / m ³ , vertido desde camión.	0,584 horas / m ³

Tabla T8.15: Estimación de mano de obra de ejecución según el tipo de elemento estructural. Fuente: CYPE (2015).

Finalmente, habiéndose ya estimado en este epígrafe el impacto en mano de obra asociado al transporte de hormigón fresco, queda por estimar el impacto laboral de los **restantes procesos de transporte**. Un cálculo preciso supondría un problema complejo con múltiples variables, que requeriría un enfoque mucho más profundo que el establecido para esta Tesis, siendo innecesario para los propósitos de la misma. Todo ello al margen de la dificultad, o incluso de la potencial imposibilidad de disponer de los datos necesarios para ello. Aquí se ha realizado un cálculo sencillo destinado a estimar el orden de magnitud de la contribución de estos transportes a la generación de empleo. Dicho cálculo centra la estimación en el transporte por carretera, obviando las posibilidades de transporte ferroviario y marítimo. OFICEMEN (2008) estima la capacidad de carga de los camiones convencionales de transporte de mercancías en torno a las 24 toneladas, correspondiendo el resto de su masa máxima autorizada al peso del vehículo. Suponiendo una velocidad media del transporte por carretera de 60 km/h, se obtiene que mover 1 tonelada de carga a lo largo de 1 km implica $6,9 \cdot 10^{-4}$ horas de trabajo, valor que se ha recogido en la Tabla T8.16.

Con ello se termina de explicar la manera en que se han estimado los órdenes de magnitud parciales de la repercusión en mano de obra de las principales operaciones necesarias para construir una estructura de hormigón, incluyendo la fabricación de sus componentes. En la Tabla T8.16 se resumen los valores medios obtenidos en los cálculos anteriores.

Proceso	Repercusión mano de obra
Producción de cemento	0,000364 horas / kg
Producción de acero	0,00228 horas / kg
Producción de áridos	0,0000919 horas / kg
Elaboración de armaduras	0,024 horas / kg
Preparación de hormigón	0,0902 horas / m ³
Ejecución de la estructura	1,68 horas / m ³
Transporte de hormigón fresco	0,222 horas / m ³
Transporte de componentes y elementos	0,00069 horas / tonelada · km

Tabla T8.16: Resumen de las estimaciones de repercusión de mano de obra realizadas para los diferentes procesos.

Empleando los datos agrupados en dicha tabla es posible estimar el impacto total en generación de empleo de una estructura de hormigón, así como su desglose por procesos. Para ello es necesario establecer un determinado tipo de estructura, caracterizado por la dosificación del hormigón, la cuantía de armado y varios parámetros relativos al transporte de materiales. A modo de ejemplo, se propone como base de cálculo un m³ de hormigón HA-25 B armado con 50 kg de acero, con una dosificación de 341,7 kg/m³ de cemento, 1.880,9 kg/m³ de áridos y 205 kg/m³ de agua (relación A/C = 0,6). Dicha dosificación, así como las distancias de transporte en diferentes etapas, se recogen en la Tabla T8.17.

Hormigón armado HA-25 B	
Variable	Valor
Cantidad cemento (kg/m ³)	341,7
Cantidad árido (kg/m ³)	1880,9
Relación A/C	0,6
Cuantía armado (kg/m ³)	50
Distancia cemento – planta (km)	200
Distancia áridos - planta (km)	30
Distancia aditivos - planta (km)	300
Distancia acero - ferralla (km)	500
Distancia ferralla - obra (km)	50

Tabla T8.17: Valores que toman las variables para el cálculo del caso de estudio.

Para este caso concreto la estimación del volumen total de mano de obra generado asciende a 3,708 horas de trabajo por m³ de estructura. La Tabla T8.18 presenta los datos desglosados.

Proceso	Mano de obra (horas)
Fabricación de cemento	0,124
Fabricación de acero	0,114
Producción de áridos	0,173
Elaboración de armaduras	1,200
Preparación del hormigón	0,090
Ejecución de la estructura	1,680
Transportes	0,327
TOTAL	3,708

Tabla T8.18: Volumen de trabajo generado por m³ de estructura de hormigón para el caso de estudio.

La Figura F8.1 representa el reparto porcentual de los datos de la Tabla T8.18. Como se puede apreciar, los procesos situados al final de la cadena productiva, en particular los de elaboración de armaduras y ejecución de la estructura, son los que llevan aparejado un porcentaje de mano de obra más elevado, acercándose entre ambos al 80% del total. Por su parte, los procesos de fabricación de componentes generan, en comparación, mucho menos empleo. Estos resultados concuerdan con lo que cabría esperar, ya que es razonable pensar que la productividad de las grandes instalaciones industriales, como cementeras o acerías, debe ser muy superior a la del resto de actividades, realizadas *in situ* o en pequeños talleres, en general con un reducido nivel de automatización, y sin las características de la producción en cadena.

No ha resultado posible estimar este parámetro para la elaboración de elementos estructurales prefabricados, ya que desde la asociación que agrupa a las principales empresas del sector se nos indica que esta información no es de acceso público (ANDECE, 2016). En ausencia de datos concretos, se estima que en este tipo de instalaciones la productividad puede ser bastante más elevada que en la ejecución *in situ*, por las propias características del proceso fabricación, con trabajo en una instalación industrial fija, a cubierto de la intemperie, y con posibilidad de empleo de medios y equipos de trabajo más productivos que los empleados en obra.

La planta de prefabricación incorpora las actividades de elaboración de armaduras y preparación de hormigón, normalmente con medios similares o de productividad superior a la de los ferrallistas y plantas de hormigón preparado. La productividad en la ejecución de las piezas en taller es superior a la de ejecución *in situ*, por las razones ya resumidas. Además, disminuye la necesidad de mano de obra *in situ*, aunque no la sustituye por completo, ya que es necesario el montaje de los elementos prefabricados. Por otra parte, en la mayoría de los casos siempre existirá una parte de ejecución no prefabricada, ya que la mayoría de los forjados prefabricados suelen incluir una parte de ejecución a realizar en obra. Así, en el caso de las placas alveolares, se ejecutan *in situ* las juntas y apoyos sobre los dinteles. Además, este tipo de forjados suelen llevar una capa de compresión ejecutada *in situ*, que aporta monolitismo al forjado y contribuye a resistir los potenciales momentos negativos cerca de los apoyos. Al margen de todo lo anterior, no se suelen prefabricar determinados elementos como cimentaciones, soleras o muros estructurales.

Por todo lo dicho, la hipótesis que se contempla como más probable para estructuras con elementos prefabricados es que el montante total de horas de trabajo por m³ sea ligeramente menor al estimado anteriormente para estructuras ejecutadas *in situ*. Por un lado, se supone que los porcentajes correspondientes a los procesos de producción de componentes (cemento, acero y áridos) y de transporte serán similares. Por otro lado, la ejecución *in situ* es muy sencilla y absorbe una cantidad menor de mano de obra. Finalmente, aparece un nuevo proceso de fabricación en taller de los elementos estructurales, que englobaría la elaboración de armaduras y parte de lo que antes era ejecución *in situ*.

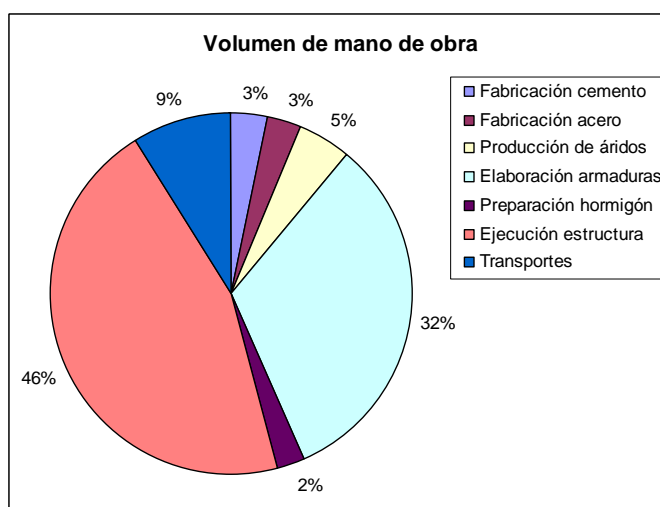


Figura F8.1: Órdenes de magnitud porcentuales del volumen total de mano de obra generado por m³ de estructura, correspondiente a cada proceso, en función de las estimaciones realizadas.

8.5 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han analizado diversos aspectos, con la intención de terminar la tarea comenzada en el Capítulo 2, relativa a la identificación de los criterios o indicadores que se deberían incluir en los pilares económico y social de la evaluación de la sostenibilidad de una estructura de hormigón. También se ha reflexionado sobre la importancia relativa de dichos aspectos.

Con respecto al ámbito económico, en el epígrafe 8.3 se han estimado costes del ciclo de vida, de una forma parecida a la empleada en los análisis realizados sobre aspectos ambientales, en capítulos anteriores. Se ha analizado la utilidad de los conceptos de coste del ciclo de vida, y de coste anual equivalente. También se ha reflexionado acerca del papel de la durabilidad de la estructura en lo económico, y de los aspectos esenciales de la misma a la hora de incluirla en modelos de evaluación de la sostenibilidad.

En lo relativo al pilar social, tras constatar la importancia que se da a la creación de empleo por parte de la población y de la literatura existente, en el epígrafe 8.4 se han identificado los diferentes grupos o actores que intervienen en el proceso de creación de una estructura de hormigón. Tras ello se ha estimado la contribución de cada uno de ellos a la generación de empleo, en los diferentes procesos de fabricación, transporte y ejecución, con objeto de establecer la importancia relativa de cada grupo.

En materia económica, de la exposición llevada a cabo en el epígrafe 8.3 cabe señalar las siguientes conclusiones:

- A lo largo del ciclo de vida de una estructura de hormigón concurren diversos tipos de costes, cuyo análisis detallado debería formar parte de la documentación que acredite la sostenibilidad económica de la estructura evaluada.
- A efectos de sostenibilidad, el parámetro más indicativo del desempeño económico no es el coste total del ciclo de vida, sino el coste anual equivalente.
- Mejoras en los diferentes parámetros que influyen en la durabilidad de una estructura permiten alargar su vida útil, haciendo que el periodo de tiempo en el que se reparte el coste total sea más amplio y, por tanto, llevando a una disminución del coste anual equivalente. En una alternativa económicamente sostenible, el incremento del coste total que supone el incremento de la durabilidad se ve compensado por una significativa reducción del coste anual equivalente.
- El final de la vida útil de una estructura puede llegar antes de que disminuya el grado de cumplimiento de sus exigencias (estados límite), al entrar en juego otros factores que, aunque no comprometan la seguridad, hagan que la estructura o el conjunto constructivo del que forma parte se hayan quedado obsoletos. A veces estos factores son totalmente ajenos a la propia estructura.
- En estructuras destinadas a usos temporales o provisionales, cuya vida útil mínima de proyecto establecida en la EHE-08 puede ser bastante o incluso mucho mayor que su vida útil

real, a efectos de sostenibilidad cabe valorar su aptitud para el reaprovechamiento, en lugar de su durabilidad.

- En la evaluación de la sostenibilidad de estructuras destinadas a usos permanentes, su durabilidad será más relevante cuanto menor sea la probabilidad de que su vida útil se agote por causas no estructurales.

En cuanto al ámbito social, se puede asegurar que la generación de empleo es el factor más relevante en estos momentos, aunque no sea el único. El empleo puede mitigar el incremento de la desigualdad, que se ha convertido en tendencia creciente en los países desarrollados. Analizando la generación de empleo en la construcción de estructuras de hormigón, se establecen las siguientes conclusiones:

- Los principales grupos o partes interesadas, generadores de empleo a efectos de lo tratado en la presente Tesis, son los fabricantes de componentes (cemento, acero, áridos), los suministradores de productos intermedios (hormigón preparado, armaduras, y elementos prefabricados), las empresas constructoras o contratistas, y las empresas de transporte.

- La mayor parte del empleo generado corresponde a la ejecución de la estructura y a la elaboración de armaduras, seguido de lejos por los procesos de transporte. La fabricación de componentes y la preparación de hormigón en central son procesos con una incidencia mucho menor sobre el nivel de empleo, debido a sus características de industrialización y automatización. Cuando existe un empleo significativo de elementos prefabricados, su producción puede considerarse también dentro de las de mayor generación de empleo, si bien es posible que globalmente se reduzca ligeramente el nivel de empleo de mano de obra, por las razones que se han expuesto en este capítulo.

- En el marco del desarrollo de un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad, parte de los aspectos sociales a evaluar deberán considerarse de forma particularizada para cada grupo o actor participante en la ejecución. En cuanto a generación de empleo, la clara distinción entre procesos principales y secundarios, incluida en este capítulo, debe ser tenida en cuenta a la hora de establecer los correspondientes coeficientes de ponderación de cualquier modelo de evaluación de la sostenibilidad.

Todas estas conclusiones se han tenido en cuenta para el desarrollo de los capítulos 9 y 10.

**CAPÍTULO 9: ANÁLISIS CRÍTICO DEL MODELO DE EVALUACIÓN
DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA INSTRUCCIÓN ESPAÑOLA DE
HORMIGÓN ESTRUCTURAL EHE-08**

CAPÍTULO 9: ANÁLISIS CRÍTICO DEL MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA INSTRUCCIÓN ESPAÑOLA DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL EHE-08

9.1 INTRODUCCIÓN

El objeto del presente capítulo es, por un lado, analizar los parámetros estudiados por el Anejo 13 de la EHE, con objeto de comprobar si dicho modelo aborda todos los aspectos importantes que debería tener en cuenta un modelo de este tipo. Por otro, determinar el grado de adecuación de los pesos asignados a aquellos parámetros en la determinación de los índices ISMA e ICES de la EHE.

Para ello se parte de los trabajos previos descritos en los capítulos anteriores. En el Capítulo 2 se han comentado diversos aspectos que debería tener en cuenta un modelo de sostenibilidad de estructuras de hormigón. En los capítulos 4 a 7 se ha estudiado el impacto ambiental de los diferentes procesos que confluyen en la construcción de una estructura de hormigón, ofreciéndose un modelo de cálculo que permite determinar el consumo energético y las emisiones de CO₂, NO_x, CO, VOC, SO_x y PM₁₀. Dicho modelo se ha incluido en el epígrafe (en el epígrafe 7.4 (Capítulo 7). Para complementar lo previamente indicado en el Capítulo 2, en el Capítulo 8 se han realizado diversas reflexiones acerca de los aspectos económicos y sociales de la sostenibilidad estructural, se ha discutido sobre la relevancia de la durabilidad del hormigón como principal aspecto económico del mismo, y se ha estimado el volumen de mano de obra generado por la construcción de una estructura, como aspecto clave de la vertiente social del problema. Las reflexiones y resultados obtenidos en los capítulos anteriores han sido utilizados en este capítulo para compararlos con lo contemplado en el Anejo 13 de la EHE en vigor.

También se ha empleado en este capítulo el estudio de sensibilidad de dicho Anejo 13, desarrollado en una Tesis Doctoral anterior por Gómez (2012). Las conclusiones de dicho análisis de sensibilidad y las correspondientes al estudio desarrollado en este capítulo han sido publicadas con dicho autor, de forma conjunta, en la referencia Mel et al. (2015).

9.2 METODOLOGÍA

Los diferentes aspectos medioambientales del modelo de la EHE se integran en el denominado Índice de Sostenibilidad Medioambiental (ISMA), y se organizan en 11 requerimientos medioambientales de acuerdo con el árbol de requerimientos que aparece representado en la Figura F2.1 del Capítulo 2. La EHE denomina requerimientos, sub-requerimientos y criterios a los tres niveles del árbol, tomados de izquierda a derecha.

Algunos de los aspectos de la evaluación de la sostenibilidad estructural son susceptibles de un análisis cuantitativo. Este es el caso, por ejemplo, de los niveles de emisión de contaminantes o de consumo de energía estudiados en los capítulos 4 a 7. Hay otros aspectos que sólo se pueden analizar de forma cualitativa. Por otro lado, los impactos o consecuencias de cada aspecto evaluado pueden ser de diferente naturaleza; de ahí la necesidad de un enfoque holístico como el realizado por medio del método MIVES.

Para realizar este análisis crítico se han tratado en primer lugar los aspectos cuantitativos. El modelo de cálculo de parámetros ambientales que se detalla en el Capítulo 7 (epígrafe 7.4) permite introducir casos “tipo” de estudio, formados por una dosificación, una cuantía de armado y un conjunto de distancias de transporte de componentes y hormigón, señalados como habituales por los profesionales del sector que se han entrevistado. En función de los resultados de aplicar dicho modelo, se puede jerarquizar la importancia de cada proceso o componente, desde el punto de vista ambiental. Esta jerarquización será comparada con la relevancia y sensibilidad máxima de estos aspectos en el Anejo 13 de la EHE.

Es posible priorizar la importancia relativa de determinadas variables sobre el impacto ambiental causado por el hormigón estructural. Para variables como la utilización de adiciones o de combustibles alternativos en la fabricación de cemento, dicha importancia relativa puede estimarse por medio de la comparación de resultados obtenidos del análisis de instalaciones reales, según se indica en el Capítulo 4. La comparación de estos resultados con lo recogido en la EHE permite el análisis crítico necesario para la elaboración del nuevo modelo.

Los aspectos cualitativos han sido estudiados en base a lo reflejado en la literatura existente y a las conversaciones mantenidas con diversos profesionales. Debe tenerse en cuenta que los aspectos cuantitativos sólo suponen una fracción del total de puntos de vista a tener en consideración en una evaluación global.

En la vertiente económica, el Anejo 13 presta atención únicamente a la durabilidad. Este aspecto, así como su importancia y sensibilidad máxima asociados, han sido analizados aquí según las conclusiones del Capítulo 8.

Por último, se han analizado también los aspectos sociales considerados por la EHE, en este caso según dos enfoques:

- Por un lado, como aspecto cuantitativo, teniendo en cuenta la generación de mano de obra estimada en el Capítulo 8 para los distintos procesos de fabricación, transporte y ejecución.

- Por otra parte, considerando la relevancia cualitativa de aspectos o indicadores de sostenibilidad social reflejados en la literatura existente y no contemplados por la EHE.

9.3 ESTUDIO AMBIENTAL DE CASOS PRÁCTICOS

9.3.1.- Estudio de un hormigón de dosificación habitual

La dosificación de un hormigón, como es evidente, depende de varios factores, entre ellos las prestaciones estructurales requeridas y la clase de exposición ambiental. También puede jugar un papel importante la disponibilidad de materias primas en la planta de hormigón, ya que según se ha puesto de manifiesto en las conversaciones mantenidas con profesionales de este sector, no es extraño que las plantas elaboren mezclas diferentes a las dosificaciones establecidas en proyecto, en función de los cementos, aditivos y áridos de que disponen en sus silos, sabiendo que se cumplirán (generalmente con sobrada holgura) los requisitos solicitados por el cliente y analizados en los ensayos de control de calidad. Por otra parte, las empresas de hormigón no suelen tener predisposición a indicar estas dosificaciones, ya que en ellas se puede encontrar parte de su ventaja competitiva.

Para el desarrollo del presente capítulo se hace necesario establecer una base de partida sobre la que estudiar los impactos del hormigón sobre el entorno y realizar comparaciones entre diferentes opciones, tanto de cara al estudio del modelo de evaluación de sostenibilidad ofrecido por la EHE como al desarrollo del nuevo modelo que se aporta en el capítulo siguiente de esta Tesis. De este modo, y dejando al margen las consideraciones anteriores, se propone como base de cálculo un hormigón el mismo armado HA-25 B del capítulo anterior, de consistencia blanda, con una cuantía de armado de 50 kg de acero por m³, considerando todo ese acero como procedente íntegramente de una acería eléctrica. La dosificación de este hormigón, determinada según el método indicado por García et al. (2010), es de 341,7 kg/m³ de cemento, 1.880,9 kg/m³ de áridos y 205 kg/m³ de agua (relación A/C = 0,6), a lo que se añaden 5 kg de aditivo plastificante. El hormigón así definido se entiende como representativo de muchos de los empleados comúnmente en estructuras convencionales, no afectadas por singularidades como grandes luces o alturas, o exposición a ambientes agresivos, entre otras. Buena parte de los hormigones de edificación industrial y residencial, y de obras civiles convencionales, son de este tipo. Obviamente, se emplean también hormigones de mayores resistencias, incluso en construcciones convencionales. Así, por ejemplo, en naves industriales los dinteles prefabricados suelen ser pretensados, con resistencias de 40 o 45 MPa. También hay estructuras convencionales que pueden tener cuantías superiores de acero. En todo caso, las conclusiones a las que se llega al analizar hormigones de mayores resistencias, o con mayores cuantías de acero, son parecidas o iguales a las que se van a exponer aquí.

La dosificación que se ha propuesto se toma como dato de entrada en el modelo de determinación del consumo energético y emisiones contaminantes que se detalla en el capítulo 7, epígrafe 7.4. Para poder aplicar correctamente este modelo es necesario introducir un segundo grupo de variables, compuesto por las distancias de transporte entre las diferentes etapas del proceso. Se recogen en la Tabla T9.1 todas las variables anteriores. Se asumen además como hipótesis que todos los transportes se realizan por carretera, mediante camión articulado con motor diesel.

Hormigón armado HA-25 B	
Variable	Valor
Cantidad cemento (kg/m ³)	341,7
Cantidad árido (kg/m ³)	1880,9
Cantidad aditivo (kg/m ³)	5
Relación A/C	0,6
Cuantía armado (kg/m ³)	50
Distancia cemento - planta (km)	200
Distancia áridos - planta (km)	30
Distancia aditivos - planta (km)	300
Distancia acero - ferralla (km)	500
Distancia ferralla - obra (km)	50
Distancia planta - obra (km)	25

Tabla T9.1: Variables para el cálculo del caso de estudio.

Empleando la expresión [E7.1] del Capítulo 7, junto con los factores de las tablas T7.22 a T7.25 de dicho capítulo, es posible estimar el consumo energético y la emisión de contaminantes por m³ de estructura, con los datos de partida de la Tabla T9.1. Como se ha reflejado ya en el Capítulo 7, cada uno de los factores recogidos en las tablas indicadas incluye una estimación triple, con un rango (mínimo – máximo) y un valor medio. De ser necesario, todo lo realizado en este capítulo se podría hacer por triplicado, empleando la misma sistemática de cálculo y los tres valores aludidos. Para una mayor simplicidad y brevedad de la exposición, en este capítulo sólo se realizan cálculos con los valores medios. Estos valores permiten establecer los órdenes de magnitud de la contribución de cada proceso o componente al impacto global. Los resultados de aplicar [E7.1] con valores medios se recogen en la Tabla T9.2.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Hormigón HA-25 B (densidad 2.432,62 kg/m³) + 50 kg acero /m³	E (MJ/m³)	CO₂ (kg/m³)	NO_x (g/m³)	CO (g/m³)	VOC (g/m³)	SO_x (g/m³)	PM₁₀ (g/m³)
Producción cemento	1499,38	265,84	479,06	512,55	22,07	158,86	105,18
Producción acero	507,00	31,15	50,45	26,90	13,45	30,40	6,95
Producción áridos	63,95	4,14	29,31	9,26	3,02	4,25	95,57
Producción plastificante	23,00	1,10	2,60	0,55	2,75	4,25	0,0000
Total componentes	2093,33	302,23	561,42	549,26	41,30	197,76	207,70
Procesado en planta	9,38	0,46	0,77	1,06	0,50	1,44	0,26
Preparación ferralla	15,00	0,95	0,0015	0,0008	0,0004	0,0009	0,0002
Puesta en obra	19,22	1,43	7,76	111,51	29,30	0,25	0,69
Total procesado y obra	43,60	2,84	8,53	112,57	29,80	1,69	0,95
Transporte cemento a planta	100,46	6,97	73,12	16,61	4,24	0,35	2,05
Transporte árido a planta	82,95	5,76	60,38	13,71	3,50	0,29	1,69
Transporte aditivo a planta	2,21	0,15	1,61	0,36	0,09	0,01	0,05
Transporte acero a obra	40,43	2,81	29,43	6,68	1,71	0,14	0,83
Transporte hormigón a obra	87,90	6,60	69,25	15,75	4,00	0,04	1,95
Total transportes	313,94	22,28	233,78	53,12	13,53	0,82	6,56
Total estructura	2450,87	327,35	803,73	714,95	84,63	200,26	215,20

Tabla T9.2: Estimación de consumo energético y emisiones contaminantes por m³ de estructura, para el hormigón estructural del caso estudiado.

En dicha tabla, los datos se han agrupado en tres grandes categorías: (i) producción de componentes, (ii) transportes, y (iii) procesado y puesta en obra. Los resultados se representan gráficamente en las figuras F9.1 a F9.7, donde los procesos incluidos dentro de la producción de componentes aparecen desglosados para aportar mayor claridad.

Los parámetros que han sido objeto de un estudio más detallado en esta Tesis son el consumo de energía primaria y la emisión de CO₂, como se ha puesto de manifiesto anteriormente. Son también los parámetros más habitualmente referidos en la bibliografía al estudiar el impacto ambiental del hormigón, y por ello serán los analizados en primer nivel.

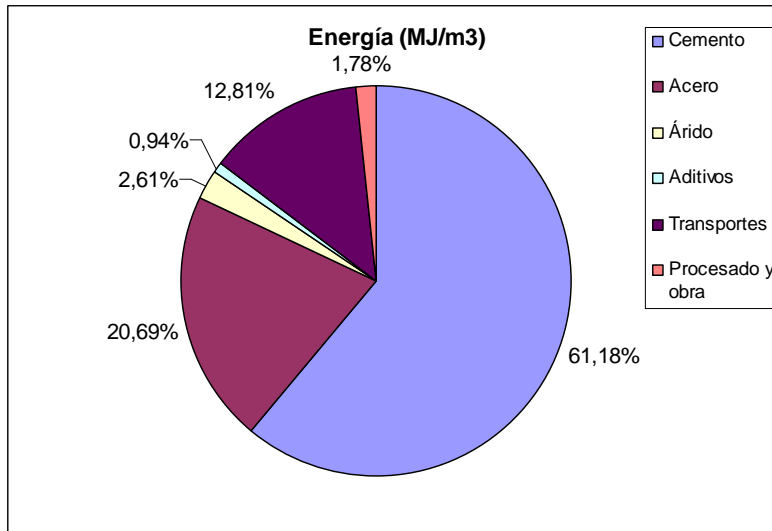


Figura F9.1: Reparto del consumo de energía primaria en la estructura de HA-25 B estudiada, con 50 kg de acero primario por m³ de estructura.

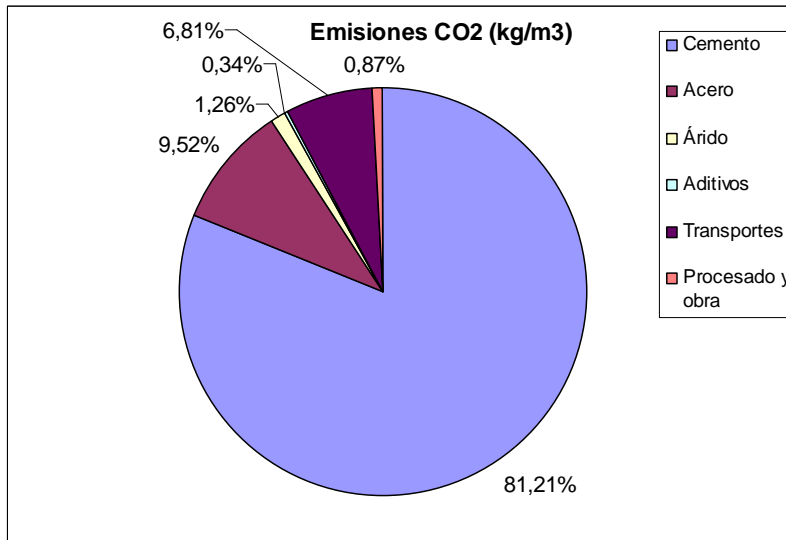


Figura F9.2: Reparto de las emisiones de CO₂ en la estructura de HA-25 B estudiada, con 50 kg de acero primario por m³ de estructura.

Tanto en consumo de energía como en emisiones de CO₂, puede destacarse la primacía de la producción de componentes sobre los otros dos grupos, situándose un orden de magnitud por encima de los transportes y dos órdenes por encima del procesado y puesta en obra. Dentro de los componentes, es la producción de cemento el proceso más relevante, con gran diferencia, seguido a cierta distancia por el acero. Debe tenerse en cuenta que en este caso de estudio se están contabilizando 50 kg de acero por cada 341 kg de cemento.

Las emisiones de otros contaminantes proceden, como se ha visto en los capítulos 4 a 7, de realizar una estimación de menor precisión que las de los parámetros anteriores. Asimismo, la magnitud total de estas emisiones es notablemente inferior, en términos cuantitativos, a la del CO₂. Nótese que se miden en g/m³, frente a los kg/m³ empleados en el dióxido de carbono. De todas formas, esta

apreciación en ningún caso pretende minusvalorar los impactos ambientales provocados por estas sustancias.

Analizando estas emisiones, en función de lo observado en las figuras F9.3 a F9.7, se puede observar que la producción de cemento continúa siendo el proceso de mayor incidencia ambiental, si bien en algunos casos su superioridad sobre todos los demás procesos no es tan acusada.

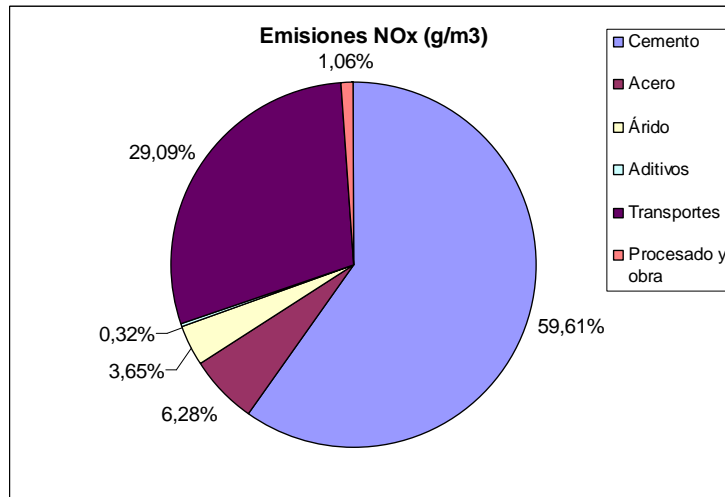


Figura F9.3: Reparto de las emisiones de NO_x en la estructura de HA-25 B estudiada, con 50 kg de acero primario por m³ de estructura.

Los procesos de transporte, en este caso considerados únicamente por vía terrestre mediante camión diesel, implican emisiones de óxidos de nitrógeno que, si bien resultan inferiores a las producidas durante la fabricación de cemento, en su conjunto resultan de una importancia considerable.

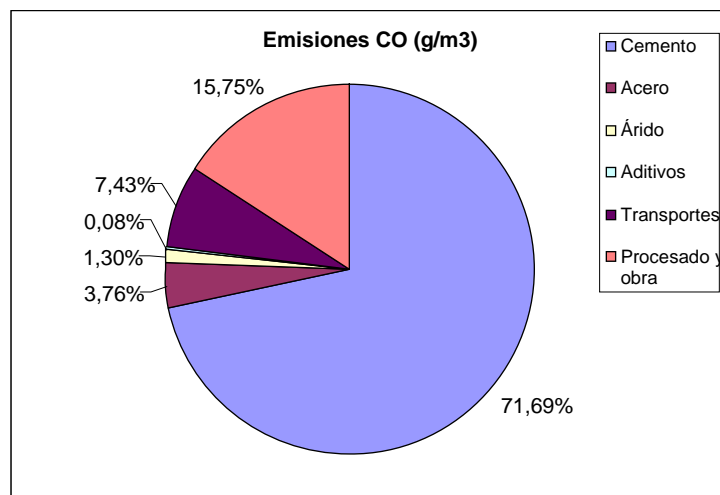


Figura F9.4: Reparto de las emisiones de CO en la estructura de HA-25 B estudiada, con 50 kg de acero primario por m³ de estructura.

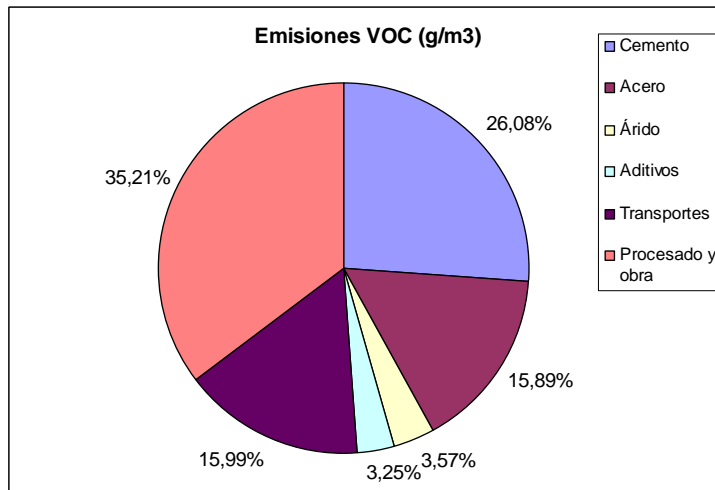


Figura F9.5: Reparto de las emisiones de VOC en la estructura de HA-25 B estudiada, con 50 kg de acero primario por m³ de estructura.

Durante la puesta en obra del hormigón se ha considerado el empleo de vibradores accionados por motores de gasolina de dos tiempos, motivo por el cual se obtienen emisiones de monóxido de carbono y de compuestos orgánicos volátiles superiores a las registradas en los restantes casos. En el caso de los VOC llegan incluso a superar a los emitidos durante la producción del cemento.

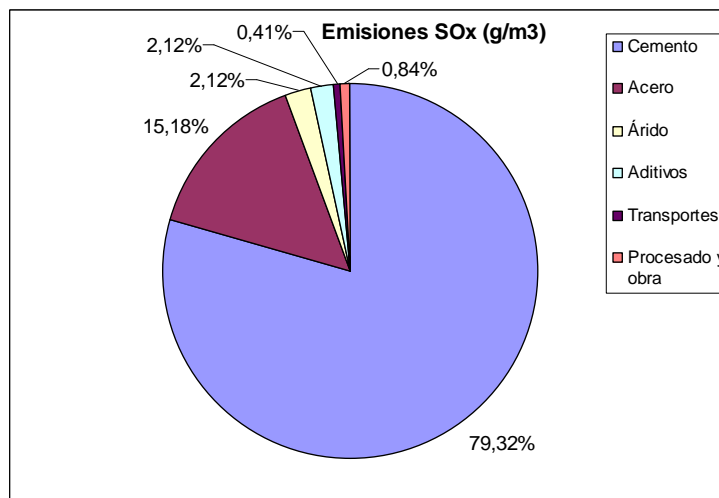


Figura F9.6: Reparto de las emisiones de SO_x en la estructura de HA-25 B estudiada, con 50 kg de acero primario por m³ de estructura.

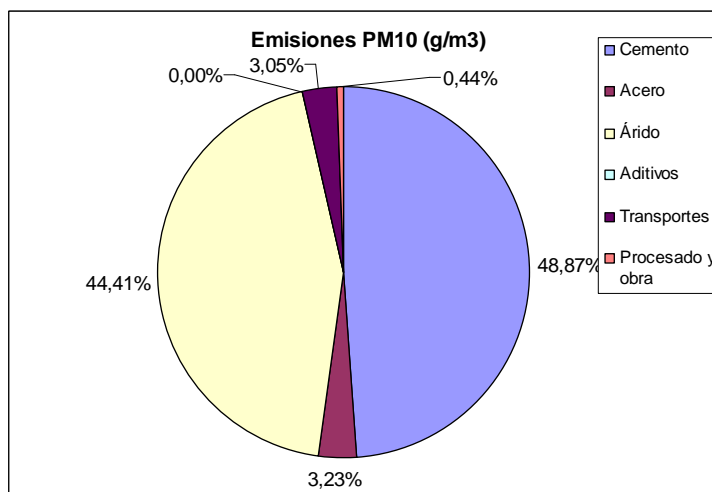


Figura F9.7: Reparto de las emisiones de PM₁₀ en la estructura de HA-25 B estudiada, con 50 kg de acero primario por m³ de estructura.

Las emisiones de partículas son, como cabría esperar, especialmente altas en los procesos en los que interviene la explotación de canteras: producción de áridos y de cemento. En realidad, las emisiones por unidad de producto son notablemente superiores durante la producción del cemento, ya que a las emisiones en cantera deben sumarse las debidas a la calcinación de las materias primas minerales. No obstante, dentro del cómputo global, ambos factores aparecen prácticamente igualados debido a que la dosificación de áridos supera ampliamente a la de cemento.

De esta forma, en términos globales puede afirmarse que la producción de cemento es, con diferencia, el aspecto de mayor incidencia ambiental dentro de una estructura de hormigón. Por detrás se encuentran la producción de acero, cuya importancia depende fuertemente de la cuantía de armado, y los transportes, en los cuales la distancia a cubrir entre las diferentes etapas es la variable de mayor importancia.

9.3.2.- Estudio de diferentes tipos de cemento

Para elaborar la Tabla T9.2 se han empleado factores referidos a la producción de cemento que proceden del análisis de los datos de producción de los años 2006 a 2010, para las 35 plantas integrales españolas, según se describe en el Capítulo 4. Una de esas plantas, situada en el municipio andaluz de Alcalá de Guadaíra (Cementos Portland Valderrivas, 2010d) produjo en 2009 únicamente cementos de los tipos CEM I (sin adiciones) y CEM II (con adición de cenizas volantes y calizas), sin emplear en ningún caso combustibles alternativos. Partiendo de los resultados obtenidos para esta planta, se pretende ilustrar la influencia de algunas variables sobre la energía y las emisiones de CO₂ por unidad de masa de hormigón armado, con objeto de complementar lo expuesto en el epígrafe anterior. Se omiten en los cálculos siguientes las emisiones de contaminantes diferentes al dióxido de carbono dado que, como se ha indicado anteriormente, su estimación se realiza de modo indirecto y no se basa en los datos estadísticos recopilados por la patronal (OFICEMEN, 2012b).

La Tabla T9.3 resume los registros de la instalación industrial de Alcalá de Guadaíra, que serán empleados en el estudio.

Fábrica CPV Alcalá de Guadaira – Año 2009	
Clinker producido	839470 t
Cemento producido	1142640 t
Materias primas principales	1337316 t
Yeso	74647 t
Caliza (adición)	109654 t
Materias primas secundarias	27969 t
Cenizas volantes (adición)	48275 t
Coke consumido	94376 t
Fuelóleo consumido	97 t
Gasoleo consumido	203 t
Electricidad consumida en producción clinker	50299 MWh
Electricidad consumida en producción cemento	58209 MWh
Electricidad consumida en servicios generales	15622 MWh
Proporción CEM I sobre total	17%
Proporción CEM II sobre total	83%
Emisiones CO2 directas	730411 t CO2
Materias primas procedentes de cantera	937468 t
Distancia desde cantera (estimada)	25 km
Distancia de transporte de otras materias primas (estimada)	50 km
Distancia de transporte de combustibles (estimada)	200 km

Tabla T9.3: Datos de partida para la fábrica CPV Alcalá de Guadaira en 2009. Fuente: Cementos Portland Valderribas (2010d).

Al carecer de una información más detallada de la planta, se analizan los datos disponibles para repartir de un modo coherente los consumos energéticos y de materiales entre las dos variedades de cemento producidas.

Primeramente, las proporciones de CEM I (17%) y CEM II (83%) permiten determinar la cantidad producida de cada uno de ellos, en base a la producción total de 1.142.640 t. La Instrucción de Recepción de Cementos RC-16 (Ministerio de Presidencia, 2016) indica un contenido en clinker para el CEM I del 95%. En función de ello es posible determinar la parte del clinker total que se emplea en producir este cemento. La diferencia entre la cantidad total de CEM I y la cantidad de clinker empleado en su producción, esto es, el 5% restante, será ocupada por yeso dihidrato y materias primas secundarias.

El cemento CEM II puede presentar un porcentaje variable de clinker y adiciones. Teniendo en cuenta que en realidad la fábrica produce varios cementos de cada tipo, en este caso se ha optado por simplificar el análisis considerando un único cemento, compuesto por la totalidad de las adiciones registradas por la planta (caliza y cenizas volantes), la cantidad de yeso y materias primas secundarias no empleado en la elaboración del CEM I, el clinker restante producido por la planta, y una cierta cantidad de clinker procedente de almacenamiento, con objeto de que cuadre el balance total de masas. El CEM II “teórico” producido de este modo presenta un porcentaje de adiciones en torno al 17%. En la Tabla T9.4 se recogen los resultados de los cálculos comentados. Una vez establecido este reparto se emplea el esquema de cálculo descrito en el Capítulo 4, junto con los factores auxiliares recogidos en los anejos 2 y 3, para determinar la energía y emisiones de CO₂

asociados a cada uno de los dos cementos. A diferencia del cálculo realizado en el Capítulo 4, ahora se buscan valores de una planta concreta, en vez de los valores medios calculados anteriormente. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas T9.5, T9.6 y T9.7.

Fábrica CPV Alcalá de Guadaira – Año 2009	
(1) Clinker total	839470 t
(2) Cemento total	1142640 t
(3) CEM I	$(2) \cdot 0,17 = 194248,8$ t
(4) CEM II	$(2) \cdot 0,83 = 948391,2$ t
(5) Yeso + MMPPsec	102616 t
(6) Adiciones (caliza + cenizas)	157929 t
(7) % medio adiciones en CEM-II	$(6) / (4) = 16,65\%$
(8) clinker en CEM-I (95%)	$(3) \cdot 0,95 = 184536,4$ t
(9) yeso y otros CEM-I	$(3) - (8) = 9712,44$ t
(10) yeso y otros CEM-II	$(5) - (9) = 92903,56$ t
(11) clinker en CEM-II	$(4) - (6) - (10) = 697558,6$ t
(12) clinker procedente silos	$(11) - ((1) - (8)) = 42625$ t

Tabla T9.4: Fábrica CPV Alcalá de Guadaira en 2009: estimación del reparto de materias primas entre CEM I y CEM II.

Producción de clinker	
Energía transporte MMPP cantera	34451,95 GJ
Energía transporte resto de MMPP	29388,83 GJ
Energía combustibles	3484680 GJ
Energía transporte de combustibles	27834,74 GJ
Energía eléctrica	410256,6 GJ
Energía total	
	3986612 GJ
Energía por tonelada	
	4,748963 GJ/t
Emissiones CO₂	
Emissiones CO ₂ transporte MMPP cantera	2411,636 t CO ₂
Emissiones CO ₂ transporte resto MMPP	2057,218 t CO ₂
Emissiones CO ₂ directas	730411 t CO ₂
Emissiones CO ₂ producción de combustibles	32480 t CO ₂
Emissiones CO ₂ transporte de combustibles	1948,432 t CO ₂
Emissiones CO ₂ del sistema eléctrico	21384,48 t CO ₂
Emissiones CO₂ totales	
	790692,8 t CO ₂
Emissiones CO₂ por tonelada	
	0,941895 t CO₂ / t

Tabla T9.5: Fábrica CPV Alcalá de Guadaira en 2009: consumo de energía y emisión de CO₂ en la producción de clinker.

Producción de CEM I	
Energía producción clinker	876356,4 GJ
Energía transporte MMPP	713,8643 GJ
Energía eléctrica	79237,2 GJ
Energía total	
	956307,4 GJ
Energía por tonelada	4,923106 GJ/t
Emissiones CO₂ clinker	
	173813,9 t CO ₂
Emissiones CO₂ transporte MMPP	
	49,9705 t CO ₂
Emissiones CO₂ sistema eléctrico	
	4130,211 t CO ₂
Emissiones CO₂ totales	
	177994,1 t CO ₂
Emissiones CO₂ por tonelada	0,91632 t CO₂/t

Tabla T9.6: Fábrica CPV Alcalá de Guadaira en 2009: consumo de energía y emisión de CO₂ en la producción de CEM I.

Producción de CEM II	
Energía producción clinker	3312680 GJ
Energía transporte MMPP	18436,19 GJ
Energía eléctrica	386864 GJ
Energía total	
	3717980 GJ
Energía por tonelada	3,920303 GJ/t
Emissiones CO₂ clinker	
	657027,1 t CO ₂
Emissiones CO₂ transporte MMPP	
	1290,534 t CO ₂
Emissiones CO₂ sistema eléctrico	
	20165,15 t CO ₂
Emissiones CO₂ totales	
	678482,8 t CO ₂
Emissiones CO₂ por tonelada	0,715404 t CO₂ / t

Tabla T9.7: Fábrica CPV Alcalá de Guadaira en 2009: consumo de energía y emisión de CO₂ en la producción de CEM II.

Analizando dichas tablas, puede señalarse que frente a un CEM I con un 95% de clinker, un CEM II con un 16% de adiciones puede suponer una disminución de un 20,4% en el consumo de energía primaria y de un 21,9% en las emisiones de CO₂.

Un segundo aspecto a estudiar en la producción de cemento es la influencia de la sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos. Para ello se han aprovechado los datos de la misma fábrica que se está analizando, en la cual no fueron utilizados combustibles de este tipo durante el año de referencia, y se ha construido un supuesto de cálculo de emisiones para un escenario en el que un 15% de la energía térmica aportada por el combustible procede de biomasa. Según los datos estadísticos tomados de OFICEMEN (2012b), en 2009 el porcentaje medio de

energía térmica procedente de combustibles alternativos en las plantas españolas fue del 11,46%, existiendo instalaciones en las que se superó el 36%.

Como se ha indicado en el Capítulo 4, epígrafe 4.2.3, en la producción de cemento las emisiones de CO₂ directas son la suma de las debidas a la descarbonatación de la caliza y las correspondientes al empleo de los combustibles necesarios para la producción.

$$G_{\text{descarbonatación}} = G_{\text{directas}} - G_{\text{comb.directas}} \quad [E4.16]$$

En 2009 las emisiones directas de la planta considerada ascendieron a 730.411 t de CO₂, como aparece reflejado en la Tabla T9.3. La parte de estas emisiones debida a los combustibles fue determinada durante el proceso de cálculo descrito en el Capítulo 4, con un valor de 299.328 t de CO₂. En base a la expresión [E4.16] se deduce que las emisiones de dióxido de carbono debidas a la descarbonatación fueron de 431.083 t, un 59% del total de emisiones directas. De este modo, correspondió a los combustibles, todos ellos de origen fósil, el 41% de las emisiones directas.

A su vez, las emisiones directas son sólo una parte, aunque muy relevante, de las emisiones totales. Según la Tabla T9.5, las emisiones de CO₂ totales en la producción de clinker fueron de 790.693 t, lo que implica que las emisiones directas supusieron un 92,4% de las emisiones totales.

Una hipotética incorporación de biomasa a la mezcla de combustibles implicaría una reducción de las emisiones de CO₂ derivadas de la combustión, no afectando en modo alguno a la descarbonatación ni a las emisiones derivadas de otros procesos como el transporte o la energía eléctrica. Se trata de una reducción más teórica que real ya que, por convenio, la Comisión Europea (2007) asume que el factor de emisión de la biomasa es nulo, por entender que se trata de un combustible renovable que “devuelve” al entorno el CO₂ que almacenó durante su vida. Nótese que para esta biomasa las emisiones de otro tipo (SO_x, NO_x, etc.) no son nulas, y por tanto las cifras globales de emisiones pudieran ser mejores que con combustibles convencionales, pero no tan positivas como aquí se refleja.

Suponiendo un aporte de biomasa que del 15% de la energía térmica, cabe esperar ese porcentaje de disminución en las emisiones debidas a la combustión, que como se ha visto suponen un 41% de las emisiones directas, y éstas un 92,4% de las emisiones totales. De lo anterior se traduce que dicha sustitución parcial de combustible supondría una reducción de un 5,68% de las emisiones de CO₂ en la producción de clinker. Trasladando este cálculo a las producciones de los cementos de la planta que se está estudiando, se obtienen las tablas T9.8 y T9.9.

Producción de CEM I con un 15% de biomasa	
Emisiones CO ₂ producción clinker	163941,3 t CO ₂
Emisiones CO ₂ transporte MMPP	49,9705 t CO ₂
Emisiones CO ₂ sistema eléctrico	4130,211 t CO ₂
Emisiones CO ₂ totales	168121,5 t CO ₂
Emisiones CO₂ por tonelada	0,865496 t CO₂/t

Tabla T9.8: Emisión de CO₂ en la producción de CEM I para la fábrica CPV Alcalá de Guadaira, suponiendo que un 15% de la energía térmica aportada por el combustible procede de biomasa.

Producción de CEM II con un 15% de biomasa	
Emisiones CO ₂ producción clinker	619708 t CO ₂
Emisiones CO ₂ transporte MMPP	1290,534 t CO ₂
Emisiones CO ₂ sistema eléctrico	20165,15 t CO ₂
Emisiones CO ₂ totales	641163,7 t CO ₂
Emisiones CO₂ por tonelada	0,676054 t CO₂/t

Tabla T9.9: Emisión de CO₂ en la producción de CEM II para la fábrica CPV Alcalá de Guadaira, suponiendo que un 15% de la energía térmica aportada por el combustible procede de biomasa.

Comparando estas tablas con las T9.6 y T9.7, se observa que el aporte de un 15% de la energía térmica en forma de biomasa implicaría una reducción de las emisiones de CO₂ de un 5,55% en el CEM I y de un 5,50% en el CEM II.

Para estudiar la influencia de los aspectos anteriores sobre el conjunto de la estructura de hormigón se ha reelaborado la Tabla T9.2, adaptándola a la utilización de los cementos anteriores. En la Tabla T9.10 se recogen los resultados de ello para el consumo de energía y las emisiones de CO₂.

Tomando como valor de referencia el hormigón estudiado en 9.3.1 (Tabla T9.2, recogido de nuevo en la Tabla T9.10), en el que los factores de consumo energético y emisiones empleados correspondían a valores medios procedentes del estudio desarrollado en el Capítulo 4, de la Tabla T9.10 se desprende que el empleo de CEM I implica un incremento del consumo energético del 7,46% y un incremento de las emisiones de CO₂ del 14,4%, en ambos casos frente al cemento que denominaremos *medio*, analizado ya en la Tabla T9.2. Del mismo modo, si el cemento empleado es del tipo CEM II (con un porcentaje de adiciones del 16%) se obtiene una disminución del consumo energético en un 6,53% y de la emisión de CO₂ en un 6,58%. A su vez, comparado con el empleo de CEM I, el CEM II analizado implica una reducción del consumo energético del 13% y una reducción del 18% de las emisiones de CO₂.

Hormigón HA-25 B (densidad 2.432,62 kg/m ³) + 50 kg acero / m ³	Cemento medio (Tabla T9.2)		CEM I (Tabla T9.6)		CEM II (Tabla T9.7)	
	E (MJ/m ³)	CO ₂ (kg/m ³)	E (MJ/m ³)	CO ₂ (kg/m ³)	E (MJ/m ³)	CO ₂ (kg/m ³)
Producción cemento	1499,38	265,84	1682,19	313,00	1339,46	244,32
Producción acero	507,00	31,15	507,00	31,15	507,00	31,15
Producción áridos	63,95	4,14	63,95	4,14	63,95	4,14
Producción plastificante	23,00	1,10	23,00	1,10	23,00	1,10
Total componentes	2093,33	302,23	2276,14	349,39	1933,41	280,70
Procesado en planta	9,38	0,46	9,38	0,46	9,38	0,46
Preparación ferralla	15,00	0,95	15,00	0,95	15,00	0,95
Puesta en obra	19,22	1,43	19,22	1,43	19,22	1,43
Total procesado y obra	43,60	2,84	43,60	2,84	43,60	2,84
Transporte cemento a planta	100,46	6,97	100,46	6,97	100,46	6,97
Transporte árido a planta	82,95	5,76	82,95	5,76	82,95	5,76
Transporte aditivo a planta	2,21	0,15	2,21	0,15	2,21	0,15
Transporte acero a obra	40,43	2,81	40,43	2,81	40,43	2,81
Transporte hormigón a obra	87,90	6,60	87,90	6,60	87,90	6,60
Total transportes	313,94	22,28	313,94	22,28	313,94	22,28
Total estructura	2450,87	327,35	2633,68	374,50	2290,95	305,82

Tabla T9.10: Comparativa de un mismo hormigón producido con tres cementos diferentes: medio (Tabla T9.2), CEM I y CEM II.

Finalmente, en la Tabla T9.11 se analizan las consecuencias sobre las emisiones de CO₂ cuando se emplea biomasa como sustituto parcial de los combustibles habituales para producir cemento. El cemento medio producido con una sustitución del 15% implica una disminución del 4,49% de las emisiones totales de CO₂, asumiendo una disminución del 5,50% de las emisiones de CO₂ en la producción del cemento, según lo calculado anteriormente para el caso de la fábrica de Alcalá de Guadaíra. Si la comparación se realiza entre el cemento medio sin aporte de biomasa y un cemento con adiciones CEM II con sustitución del 15% de biomasa, la disminución total de emisión de CO₂ es de un 10,65%.

Hormigón HA-25 B (densidad 2.432,62 kg/m ³) + 50 kg acero / m ³	Emisiones de CO ₂ (kg/m ³)					
	Cemento medio (Tabla T9.2)	Cemento medio c/ 15% biomasa	CEM I (Tabla T9.6)	CEM I c/ 15% biomasa	CEM II (Tabla T9.7)	CEM II c/ 15% biomasa
Producción cemento	265,84	251,15	313,00	295,57	244,32	230,99
Producción acero	31,15	31,15	31,15	31,15	31,15	31,15
Producción áridos	4,14	4,14	4,14	4,14	4,14	4,14
Producción plastificante	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Total componentes	302,23	287,54	349,39	331,96	280,70	267,38
Procesado en planta	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Preparación ferralla	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Puesta en obra	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
Total procesado y obra	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84
Transporte cemento a planta	6,97	6,97	6,97	6,97	6,97	6,97
Transporte árido a planta	5,76	5,76	5,76	5,76	5,76	5,76
Transporte aditivo a planta	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Transporte acero a obra	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81
Transporte hormigón a obra	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60
Total transportes	22,28	22,28	22,28	22,28	22,28	22,28
Total estructura	327,35	312,66	374,50	357,08	305,82	292,50

Tabla T9.11: Comparativa de un mismo hormigón producido a base de cementos medio (Tabla T9.2), CEM I y CEM II, con y sin aporte de un 15% de biomasa en los combustibles empleados.

9.3.3.- Influencia del origen del acero

Tanto la literatura existente como las fuentes del sector consultadas coinciden en que la práctica totalidad del acero empleado en la producción de armaduras en España procede del reciclaje, como se ha visto en el Capítulo 5. No obstante, no existe ninguna disposición legal que impida la posibilidad de emplear acero primario, lo cual es asumido en la redacción del Anejo 13 de la EHE, que prima el empleo de acero reciclado.

En la Tabla T5.1 (Capítulo 5) se recogen datos tomados de Hammond y Jones (2011), correspondientes al consumo energético y emisiones de CO₂ del acero primario y del acero medio (61% primario / 39% reciclado), a nivel mundial. La referencia EEA (2013) aporta factores de emisión de otros contaminantes (VOC y PM₁₀) para la producción de acero primario (no aporta estimaciones de NO_x, SO_x y CO). En la Tabla T9.12 se confrontan estos datos con los correspondientes a acero reciclado, que se han empleado en los cálculos.

Tipo de acero	Energía primaria (MJ/kg)	Emisión CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Emisión VOC (g/kg)	Emisión PM ₁₀ (g/kg)
Acero primario	35,40	2,890	0,150	0,180
Acero medio mundial (61% primario / 39% reciclado)	25,30	1,950	0,223	0,155
Acero reciclado (EAF)	10,14	0,623	0,269	0,139

Tabla T9.12: Energía y emisiones para distintos tipos de acero. Fuentes: Hammond y Jones (2011), EEA (2013).

Introduciendo los datos correspondientes al acero primario y al acero medio mundial en el modelo de cálculo descrito, se obtienen las tablas T9.13 y T9.14.

Hormigón HA-25 B (densidad 2.432,62 kg/m ³) + 50 kg acero / m ³	E (MJ/m ³)	CO ₂ (kg/m ³)	VOC (g/m ³)	PM ₁₀ (g/m ³)
Producción cemento	1499,38	265,84	22,07	105,18
Producción acero primario	1770,00	144,50	7,50	9,00
Producción áridos	63,95	4,14	3,02	95,57
Producción plastificante	23,00	1,10	2,75	0,0000
Total componentes	3356,33	415,58	35,35	209,75
Procesado en planta	9,38	0,46	0,50	0,26
Preparación ferralla	15,00	0,95	0,0004	0,0002
Puesta en obra	19,22	1,43	29,30	0,69
Total procesado y obra	43,60	2,84	29,80	0,95
Transporte cemento a planta	100,46	6,97	4,24	2,05
Transporte árido a planta	82,95	5,76	3,50	1,69
Transporte aditivo a planta	2,21	0,15	0,09	0,05
Transporte acero a obra	40,43	2,81	1,71	0,83
Transporte hormigón a obra	87,90	6,60	4,00	1,95
Total transportes	313,94	22,28	13,53	6,56
Total estructura	3713,87	440,70	78,68	217,25

Tabla T9.13: Estimación de consumo energético y emisiones contaminantes por m³ de estructura, para un hormigón estructural como el del caso estudiado en las tablas T9.1 y T9.2, pero armado con acero primario.

Por comparación con la Tabla T9.2, se observa que la sustitución de acero reciclado por primario implica un incremento del consumo energético del 52% y un incremento de las emisiones de CO₂ de un 35%, para el total de la estructura. Se altera además la distribución de estos parámetros, como se puede ver en los gráficos siguientes, pasando el acero a constituir el componente de mayor consumo energético, a pesar de que, con la cuantía considerada de 50 kg/m³, el acero únicamente supone un

2% de la masa total. Téngase en cuenta que hay hormigones estructurales con cuantías muy superiores. Por el contrario, en cuanto a las emisiones de CO₂, la producción de cemento sigue predominando sobre todos los demás procesos productivos y de transporte. Las figuras F9.8 y F9.9 reflejan, respectivamente, los porcentajes de consumo de energía y emisión de CO₂ para componentes, transportes, y procesado y puesta en obra de una estructura de HA-25 B con 50 kg de acero primario por m³ de estructura.

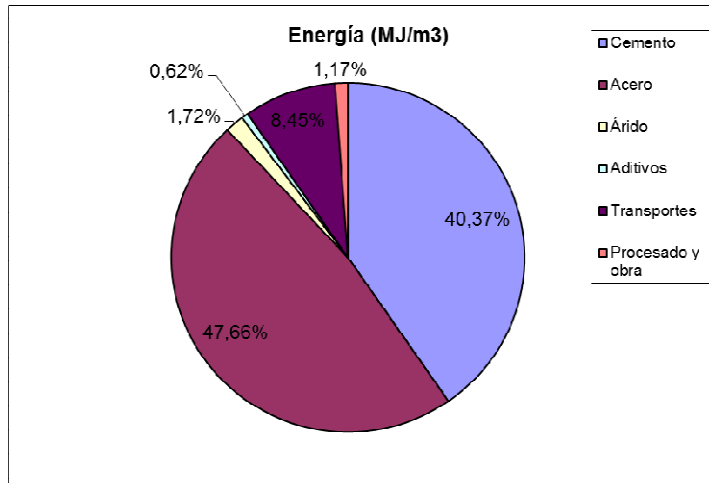


Figura F9.8: Reparto del consumo energético en una estructura de HA-25 B con 50 kg de acero primario por m³ de estructura.

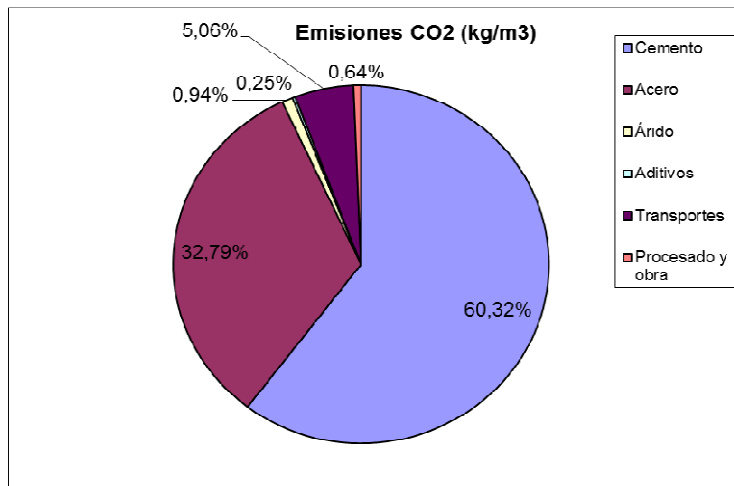


Figura F9.9: Reparto de las emisiones de CO₂ en una estructura de HA-25 B con 50 kg de acero primario por m³ de estructura.

Si se considera la utilización de un acero medio formado por un 61% de acero primario y un 39% de acero reciclado (Hammond & Jones, 2011), los incrementos con respecto a la Tabla T9.2 en el consumo energético y en las emisiones de CO₂ quedan, respectivamente, en el 31% y en el 20%.

Hormigón HA-25 B (densidad 2.432,62 kg/m³) + 50 kg acero / m³	E (MJ/m³)	CO₂ (kg/m³)	VOC (g/m³)	PM₁₀ (g/m³)
Producción cemento	1499,38	265,84	22,07	105,18
Producción acero	1265,00	97,50	11,15	7,75
Producción áridos	63,95	4,14	3,02	95,57
Producción plastificante	23,00	1,10	2,75	0,0000
Total componentes	2851,33	368,58	39,00	208,50
Procesado en planta	9,38	0,46	0,50	0,26
Preparación ferralla	15,00	0,95	0,0004	0,0002
Puesta en obra	19,22	1,43	29,30	0,69
Total procesado y obra	43,60	2,84	29,80	0,95
Transporte cemento a planta	100,46	6,97	4,24	2,05
Transporte árido a planta	82,95	5,76	3,50	1,69
Transporte aditivo a planta	2,21	0,15	0,09	0,05
Transporte acero a obra	40,43	2,81	1,71	0,83
Transporte hormigón a obra	87,90	6,60	4,00	1,95
Total transportes	313,94	22,28	13,53	6,56
Total estructura	3208,87	393,70	82,33	216,00

Tabla T9.14: Estimación de consumo energético y emisiones contaminantes por m³ de estructura, para un hormigón estructural como el del caso estudiado en las tablas T9.1 y T9.2, pero armado con un acero medio (61% primario / 39% reciclado).

9.3.4.- Estudio de los procesos de transporte

Adicionalmente, se puede estudiar también la influencia de los procesos de transporte en el desempeño ambiental del hormigón. Ciñéndose al análisis de los procesos de primer nivel, es necesario transportar cemento, áridos y aditivos hasta la planta de hormigón, y desde ella transportar el hormigón fresco hasta el emplazamiento de la obra. Por su parte, el acero debe ser transportado entre la planta siderúrgica que lo produce y las instalaciones de preparación de ferralla (etapa intermedia), y luego desde allí hasta la obra. Todos estos transportes han sido estudiados en el Capítulo 7, apoyándose en los factores de consumo energético y emisiones definidos en el Anejo 3.

En el Capítulo 7 (epígrafes 7.3.2 y 7.3.3) se determinan las distancias máximas, mínimas y medias que cabe esperar en cada etapa de transporte, al margen de circunstancias excepcionales. Las distintas conversaciones mantenidas con expertos y profesionales del sector han sido de gran ayuda para la elección de estas distancias, si bien en ellas también ha quedado de manifiesto que, en ocasiones, factores ajenos a los estrictamente técnicos pueden llevar a distancias sustancialmente diferentes. Este es el caso, por ejemplo, de grupos empresariales que disponen de plantas de hormigón y fábricas de cemento, y consumen su propio cemento en plantas ubicadas a gran distancia de la fábrica, teniendo más cerca otras plantas de producción de cemento, de empresas de la

competencia. Las distancias de transporte contempladas en el Capítulo 7 se recogen en la Tabla T9.15.

Etapa	Distancia de transporte (km)		
	Mínima	Media	Máxima
Transporte de cemento a planta de hormigón	50	200	400
Transporte de áridos a planta de hormigón	15	30	60
Transporte de aditivos a planta de hormigón	50	150	300
Transporte de acero a planta de ferralla	100	600	1200
Transporte de armaduras a obra	50	100	200
Transporte de hormigón fresco a obra	15	30	60

Tabla T9.15: Distancias de transporte en diferentes etapas (véase el Capítulo 7).

En el caso práctico empleado como base de partida en el epígrafe 9.3.1 del presente capítulo, se han asumido (Tabla T9.1) unas distancias en consonancia con los rangos estipulados en la Tabla T9.15, que llevan a los resultados de la Tabla T9.2. En ella se pone de manifiesto que los procesos de transporte suponen, en este caso concreto, un 12,8% del consumo energético total y un 6,8% de las emisiones de CO₂. Además, son responsables de casi la tercera parte de las emisiones de NO_x (29,1%). Todos estos transportes se han considerado realizados por carretera, mediante camiones articulados con motor diesel.

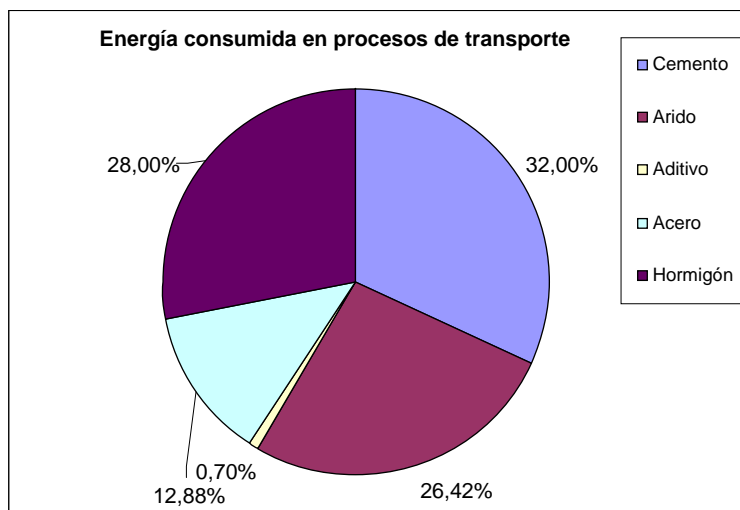


Figura F9.10: Reparto del consumo energético entre los diferentes transportes a realizar.

La Figura F9.10 muestra cómo se reparte la energía total consumida entre las diferentes etapas de transporte, donde las principales variables serían la masa de cada componente que debe ser transportado y la distancia de transporte de cada etapa. Las masas dependen de la dosificación y armado del hormigón, aunque se mantendrán en general dentro de un abanico determinado por los parámetros máximos y mínimos marcados por la EHE. Por su parte, la distancia de transporte está limitada por criterios económicos y técnicos, especialmente para el transporte de hormigón fresco.

En dicha figura se observa un reparto casi a partes iguales entre el transporte de cemento (ligeramente por encima), de áridos (de mayor masa, pero trasladados a menor distancia) y del hormigón fresco. El transporte de acero se sitúa claramente por debajo, dado que la cantidad necesaria es considerablemente menor, al haberse estimado una masa en torno al 2% de la total. Por su parte, la energía invertida en el transporte de aditivos resulta prácticamente despreciable, habiéndose estimado un consumo de 5 kg / m³ de hormigón. Los resultados son muy similares si el reparto se representa en base a las emisiones contaminantes.

Para ilustrar la posible influencia de los transportes sobre el conjunto de procesos involucrados en la creación de una estructura de hormigón, se ha recalculado la Tabla T9.2 empleando, en todas las etapas de transporte, las distancias máximas indicadas en la Tabla T9.15. El resultado se ha reflejado en la Tabla T9.16.

Hormigón HA-25 B (densidad 2.432,62 kg/m ³) + 50 kg acero / m ³	E (MJ/m ³)	CO ₂ (kg/m ³)	NO _x (g/m ³)	CO (g/m ³)	VOC (g/m ³)	SO _x (g/m ³)	PM ₁₀ (g/m ³)
Producción cemento	1499,38	265,84	479,06	512,55	22,07	158,86	105,18
Producción acero	507,00	31,15	50,45	26,90	13,45	30,40	6,95
Producción áridos	63,95	4,14	29,31	9,26	3,02	4,25	95,57
Producción plastificante	23,00	1,10	2,60	0,55	2,75	4,25	0,0000
Total componentes	2093,33	302,23	561,42	549,26	41,30	197,76	207,70
Procesado en planta	9,38	0,46	0,77	1,06	0,50	1,44	0,26
Preparación ferralla	15,00	0,95	0,0015	0,0008	0,0004	0,0009	0,0002
Puesta en obra	19,22	1,43	7,76	111,51	29,30	0,25	0,69
Total procesado y obra	43,60	2,84	8,53	112,57	29,80	1,69	0,95
Transporte cemento a planta (400 km)	200,92	13,94	146,25	33,21	8,47	0,70	4,10
Transporte árido a planta (60 km)	165,90	11,51	120,75	27,42	7,00	0,58	3,39
Transporte aditivo a planta (300 km)	2,21	0,15	1,61	0,36	0,09	0,01	0,05
Transporte acero a obra (1200 + 200 km)	102,90	7,14	74,90	17,01	4,34	0,36	2,10
Transporte hormigón a obra (60 km)	210,96	15,84	166,20	37,80	9,60	0,08	4,68
Total transportes	682,88	48,59	509,71	115,81	29,50	1,72	14,31
Total estructura	2819,81	353,65	1079,65	777,64	100,60	201,16	222,95

Tabla T9.16: Consumo energético y emisiones contaminantes para un hormigón estructural como el del caso estudiado en las tablas T9.1 y T9.2, considerando las distancias de transporte más elevadas de los rangos establecidos.

Bajo estas condiciones el consumo energético total se incrementa en un 15,1%, mientras que las emisiones de CO₂ lo hacen en un 8% y las de NO_x se elevan hasta un 34,3%. Ahora los transportes suponen un 24,2% de la energía total, un 13,7% de las emisiones de CO₂ y un 47,2% de las emisiones de NO_x, constituyendo el principal foco emisor de este contaminante.

Como ya se ha visto, los transportes considerados se realizan muy predominantemente por carretera; en el mercado interior hay muy pocos casos en los que el cemento o el acero se transporten por barco o ferrocarril. Los productos con un elevado valor añadido y que son producidos en un reducido número de instalaciones realizan los recorridos más largos. Tal es el caso del acero, que cuando procede del mercado exterior puede realizar las etapas más largas de su trayecto por vía marítima. El cemento es un material producido en un mayor número de instalaciones que el acero, y su densidad y precio por unidad de masa (entre 80 y 150 €/t en 2012) hacen que el transporte por carretera no sea rentable a distancias muy elevadas. Para su exportación también se emplea el transporte marítimo, mientras que en el mercado nacional existe la posibilidad de transporte mediante ferrocarril en parte de los trayectos más largos. En los restantes casos, la carretera es la vía mayoritaria.

9.4 ESTUDIO DE LOS ASPECTOS AMBIENTALES EN EL ANEJO 13 DE LA EHE

9.4.1.- Introducción

A continuación se presenta un estudio detallado de los diferentes aspectos incluidos en la definición del Índice de Sensibilidad Medioambiental (ISMA) de la EHE-08. El objeto de este estudio es enlazar los resultados de los análisis de casos prácticos realizados en el epígrafe 9.3, junto con el gran volumen de información tomado de la bibliografía (resumido escuetamente en el Capítulo 2), con la redacción vigente del Anejo 13 de la EHE-08, y así establecer una crítica constructiva del mismo que permita la elaboración de un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad, incluido en el siguiente capítulo de esta Tesis.

Gómez (2012) señala ya varias propuestas de mejora a la redacción del Anejo 13, en base a su aplicación en casos reales, y se realiza un análisis de sensibilidad que permite determinar la máxima influencia de cada variable de dicho modelo sobre el resultado global. Ambos desarrollos resultan de gran utilidad para el trabajo aquí realizado, y serán empleados en los epígrafes siguientes.

El Anejo 13 de la EHE (Figura F9.11) se organiza en base a una estructura en árbol a tres niveles, respectivamente de requerimientos, sub-requerimientos y criterios. El término indicadores no se usa como tal en la EHE, aunque realmente en ella hay un cuarto nivel en el cual se miden y evalúan diferentes aspectos, que podrían haberse llamado indicadores. En realidad la cosa es más complicada porque, por un lado, el Anejo 13 usa la palabra indicador en un par de ocasiones, aplicada a lo que la EHE denomina criterios; por otro, no usa el término sub-requerimientos, pero en realidad hay un nivel intermedio entre requerimientos y criterios, que en los borradores de dicho Anejo se llamaban sub-requerimientos. De hecho, la EHE no incluye una figura como la F9.11, que sin embargo forma parte de los borradores del Anejo. En dicha figura se muestran las denominaciones normalmente empleadas en MIVES, y las usadas en los borradores de la EHE.

A requerimientos, sub-requerimientos y criterios se les asignan una serie de coeficientes de ponderación, o pesos, que determinan la importancia total de cada indicador. Existen once criterios, que involucran en total a 49 variables que constituyen ese cuarto nivel no reflejado en la Figura F9.11.

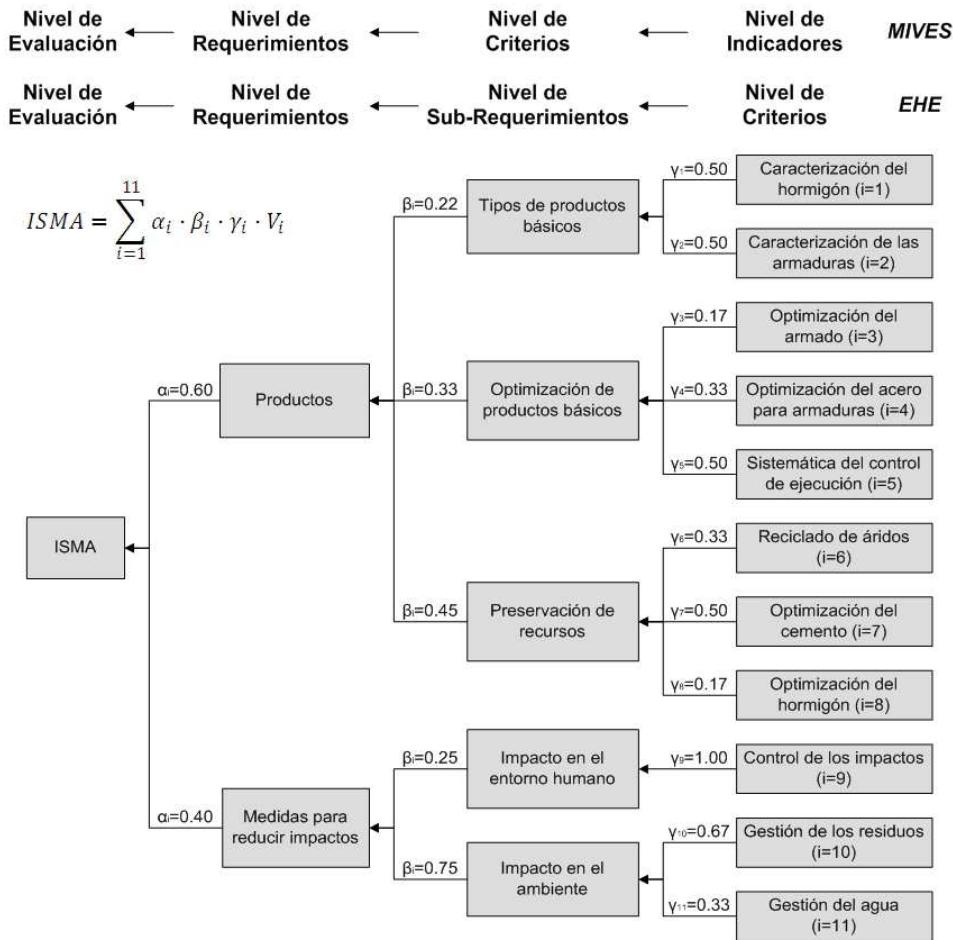


Figura F9.11.- Árbol de requerimientos para el Índice de Sensibilidad Medioambiental (ISMA) de la EHE. Fuente: Gómez (2012).

Este modelo de evaluación medioambiental está orientado a que su aplicación sea factible por parte de técnicos (proyectistas y dirección facultativa) no especializados en el análisis de ciclo de vida y en el manejo de indicadores ambientales complejos basados en la química y la biología medioambientales. Esto se consigue seleccionando una serie de variables fácilmente identificables o medibles, muchas de ellas de tipo cualitativo, y asignando puntuaciones en función de las opciones de proyecto / obra, según las tablas incluidas en el Anejo.

Existen dos aspectos a la hora de estudiar la adecuación de los pesos asignados en el modelo a cada criterio con los resultados de los estudios sobre el impacto ambiental de las estructuras de hormigón:

-Por una parte, el peso de cada criterio medioambiental en el ISMA es constante, pues procede del producto de los coeficientes de ponderación asignados a cada uno de los ramales a los que pertenece el correspondiente criterio.

-Por otra, la influencia máxima que cada una de las posibles variables puede llegar a tener en el ICES depende de los valores de otras variables, incluidas las correspondientes a la extensión de vida útil y a la contribución social. Estas influencias máximas se han estudiado en el análisis de sensibilidad realizado por Gómez (2012), que ha sido empleado en esta

Tesis para analizar su coherencia con un análisis del ciclo de vida, habiéndose publicado los resultados observados (Mel et al., 2015), que van a ser resumidos aquí.

El peso total de cada criterio en el ISMA procede (Figura F19.1) del producto de los tres coeficientes que le correspondan (requerimiento, sub-requerimiento y criterio), y se resume en la Tabla T9.17. En la Tabla T9.18 se agrupan las máximas influencias de cada variable ambiental en el ICES.

Criterio Medioambiental	Peso en el ISMA
Caracterización del hormigón	6,60%
Caracterización de las armaduras	6,60%
Optimización del armado	3,37%
Optimización ambiental del acero	6,53%
Nivel de control de ejecución	9,90%
Empleo de áridos reciclados	8,91%
Optimización del cemento	13,50%
Optimización del hormigón	4,60%
Control de impactos	10,00%
Gestión de residuos	20,10%
Gestión del agua	9,90%

Tabla T9.17.- Peso en el ISMA de los diferentes criterios medioambientales recogidos por el Anejo 13 de la EHE-08.

Variable		S_{ICES MAX}
Criterio medioambiental <i>caracterización del hormigón (i=1)</i>		
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%
Criterio medioambiental <i>caracterización de las armaduras (i=2)</i>		
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%

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

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%
Criterio medioambiental optimización del armado (i=3)		
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%
Criterio medioambiental optimización del acero para armaduras (i=4)		
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%
Criterio medioambiental sistemática del control de ejecución (i=5)		
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%
Criterio medioambiental reciclado de áridos (i=6)		
k=1	Porcentaje de áridos reciclados en la producción del hormigón.	11,14%
Criterio medioambiental optimización del cemento (i=7)		
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 ₂ en la producción del cemento.	2,63%
Criterio medioambiental optimización del hormigón (i=8)		
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%
Criterio medioambiental control de los impactos (i=9)		
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%

Criterio medioambiental <i>gestión de los residuos</i> (i=10)		
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%
Criterio medioambiental <i>gestión del agua</i> (i=11)		
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%

Tabla T9.18.- Sensibilidad máxima del ICES ($S_{ICES\ MAX}$) frente a las diferentes variables del modelo de la EHE. Fuente: Gómez (2012).

Entre las variables consideradas en la Tabla T9.18, algunos aspectos se repiten en varios criterios. Estos aspectos comunes serán comentados al principio de los epígrafes siguientes, para después centrar la atención en los específicos de cada criterio.

9.4.2.- Certificaciones medioambientales

Los criterios medioambientales de caracterización del hormigón y caracterización de las armaduras valoran, entre otros aspectos, la posesión por parte de los participantes en el proceso de creación de la estructura (centrales de hormigón preparado, plantas de ferralla, instalaciones de prefabricación, empresas constructoras) de una certificación medioambiental, considerándose que la certificación EMAS es más exigente que la UNE-EN ISO 14001. Estos dos aspectos son, de alguna manera, transversales a lo largo de los diferentes criterios valorados en el Anejo 13, ya que aparecen con frecuencia en las tablas de valoración de otros parámetros. Debido a ello, sus efectos sobre el modelo no son fácilmente cuantificables en términos numéricos.

Por la razón ya anticipada, se valora más positivamente la posesión del distintivo EMAS (Parlamento Europeo, 2009) que la certificación ISO 14001 (AENOR, 2004). Esta última norma internacional establece los requisitos y pasos a seguir para la implantación de un sistema de gestión medioambiental (SGMA), similar o paralelo a los sistemas de gestión de calidad según ISO 9001. Entre sus principios está el establecimiento de una política ambiental por parte de la empresa que incluya un compromiso de mejora continua y prevención de la contaminación, y el cumplimiento de la legislación y reglamentación ambiental aplicable. El Reglamento EMAS implica requerimientos adicionales sobre la norma ISO 14001, como la elaboración de un análisis ambiental o la publicación de la Declaración Ambiental. La Declaración Ambiental es un documento público que recoge el desempeño en materia de medio ambiente de la empresa, y que está sujeto a verificación por parte de un organismo externo autorizado.

En sí misma, la posesión de los anteriores certificados o distintivos no implica necesariamente un comportamiento ambiental mejor que el de una organización carente de ellos. Ambos se centran

primordialmente en la existencia de un sistema de gestión específico. No imponen en aspectos técnicos o ambientales límites más estrictos que los mínimos o máximos establecidos por la legislación específica o, en su caso, por la Autorización Ambiental Integrada correspondiente, con vigencia en cada momento y lugar.

Ahora bien, sí es cierto que la implantación de este tipo de sistemas encamina a la empresa en el sentido de la eficiencia ambiental, ya que están orientados a lograr una mejora continua, y las sucesivas recertificaciones suelen ser cada vez más exigentes. Además, esta certificación permite, sobre todo en el caso del EMAS, incrementar el control y la transparencia sobre las actividades empresariales. A la larga esto incentiva la mejora en el desempeño ambiental. Además, una correcta gestión ambiental de la planta y el compromiso con la eficiencia de las instalaciones y el empleo de las Mejores Tecnologías Disponibles (Ministerio Medio Ambiente, 2004) pueden disminuir los consumos energéticos y de materias primas, y en consecuencia las emisiones contaminantes.

La posibilidad de influencia máxima de las variables relacionadas con las condiciones medioambientales de las empresas es de un 16.1% para las constructoras, 13.5% para las instalaciones de prefabricación, 6.8 y 6.5% respectivamente para las centrales de hormigón preparado e instalaciones de ferralla y un 7.6% para las centrales de hormigón y ferralla en obra (Gómez, 2012). Es preciso recordar que estas cifras no son completas, ya que la condición ambiental se encuentra presente en otros criterios ambientales, por lo que su cumplimiento no sólo puntúa en el marco de este criterio.

9.4.3.- Distancias de transporte

Los criterios medioambientales “Caracterización del hormigón” y “Caracterización de las armaduras” incluyen entre sus variables la valoración de las distancias a las que se transportan respectivamente el hormigón preparado y las armaduras de acero. Esta valoración se realiza mediante penalización en la puntuación, cuando las distancias de proyecto superan unos determinados valores.

En ambos casos se indican unas distancias máximas de transporte para conservar la asignación de puntuaciones inicial. Estas distancias son de 45 Km para el transporte de hormigón preparado y de ferralla, y de 300 Km para el transporte de elementos prefabricados. Según el análisis de sensibilidad aludido, la importancia máxima en el ICES de la distancia de las instalaciones de prefabricación a la obra es de un 3% en ambos casos, y de un 1.5 y 1.4% respectivamente para las distancias entre centrales de hormigón e instalaciones de ferralla y obra.

En el epígrafe 9.3.4 de este capítulo se ha valorado la importancia ambiental de los procesos de transporte asociados a la construcción de una estructura de hormigón. En base a ello se pueden realizar una serie de consideraciones sobre el tratamiento que la EHE-08 da a esta cuestión:

- El Anejo 13 está considerando únicamente la última etapa de los procesos de transporte, es decir, el traslado a obra del hormigón fresco, armaduras o de elementos prefabricados. No se tienen en cuenta los restantes transportes recogidos en la Tabla T9.15; el epígrafe 9.3.4 de este capítulo se ha señalado que, para un caso típico con distancias de transporte por carretera habituales, el consumo energético y las emisiones contaminantes debidas al transporte de hormigón fresco están en el mismo orden que las debidas al

transporte de áridos, por un lado, y al de cemento, por otro, y son en torno al doble de los valores asignados al transporte de acero (véase la Figura F9.10). Por lo tanto, tener en cuenta únicamente los transportes de hormigón y armaduras en la evaluación de la sostenibilidad es ceñirse, aproximadamente, a un tercio del impacto total de los transportes implicados.

- Se toma únicamente una distancia “límite” a partir de la cual se penaliza la puntuación, aunque la redacción del Anejo 13 no está lo suficientemente pulida, tal como se indica en Gomez (2012), y en realidad la penalización no existe si se aplica de manera textual. Como se ha mostrado, cada proceso de transporte puede moverse en rangos de distancias diferentes y éstas pueden variar mucho, teniendo estas variaciones una incidencia importante sobre el impacto ambiental global. En el último párrafo del epígrafe 9.3.4 de este capítulo se compara la Tabla T9.16, fruto de un escenario de distancias de transporte incrementadas en todos los campos, con la Tabla T9.2, que representa una situación media o más probable. Parece lógico pensar que sería más representativo vincular la puntuación (o su penalización) a una variable continua. Adicionalmente, se podría tener en cuenta la utilización de medios de transporte alternativos a la carretera en alguna de las etapas (ferrocarril o vía marítima), lo que incidiría también en una reducción de impactos.
- La influencia máxima sobre el ICES de las variables relacionadas con las distancias de transporte es muy escasa (véase la Tabla T9.18). Sin embargo, para el caso práctico estudiado en la Tabla T9.2, los procesos de transporte suponen un 12,81% del consumo energético total y un 6,81% de las emisiones de CO₂, además de casi la tercera parte de las emisiones de NO_x (29,09%). Pasando al escenario más desfavorable, descrito en la Tabla T9.16, los transportes suponen un 24,22% de la energía total, un 13,74% de las emisiones de CO₂ y un 47,21% de las emisiones de NO_x.

9.4.4.- Criterios medioambientales “Caracterización del hormigón” (i=1) y “Caracterización de las armaduras” (i=2)

Los criterios medioambientales de caracterización del hormigón y caracterización de las armaduras son análogos entre sí, suponiendo cada uno de ellos un 6,60% del ISMA (véase la Tabla T9.17).

Valoran, en primer lugar, la posesión de un distintivo ambiental (EMAS; Parlamento Europeo, 2009) (UNE-EN ISO 14001; AENOR, 2004) por parte de distintos intervinientes en el proceso de creación de la estructura (centrales de hormigón preparado, plantas de ferralla, instalaciones de prefabricación, empresas constructoras). Estos dos aspectos son de alguna manera transversales a lo largo de los diferentes criterios valorados en el Anejo 13, ya que aparecen con frecuencia en las tablas de valoración de otros parámetros, como se han comentado en el epígrafe 9.4.2.

Se incluyen también dentro de estos dos criterios la valoración de las distancias de transporte, comentadas en el apartado 9.4.1.

El tercero de los aspectos a valorar es la inclusión en la estructura de elementos prefabricados. De entrada, cabe esperar que la ejecución de elementos estructurales prefabricados en taller suponga un

nivel de control de ejecución más intenso que el posible en una obra ejecutada in situ, con la consiguiente disminución de recursos empleados y de los coeficientes de seguridad necesarios. Se ha localizado una referencia sobre este asunto (López-Mesa et al., 2009) en la que se hace una comparación entre un forjado de edificación ejecutado in situ y otro para el mismo edificio realizado con losas prefabricadas. El resultado de la misma es favorable para la estructura ejecutada en obra, a la que se otorga un menor impacto ambiental. Consultando a la autora principal, Belinda López-Mesa, indica que la consideración de la estructura que incorpora elementos prefabricados como más desfavorable se debe a que, en realidad, la comparación no se realiza entre sistemas estructurales equivalentes:

“Los resultados obtenidos relativos a la comparación entre losa alveolar y forjado in situ se deben al hecho de que estamos tratando su aplicación a la edificación residencial. Resulta que la losa más pequeña supera con creces las necesidades estructurales. La separación entre pilares que pusimos no sólo dependía de la capacidad estructural de la losa, sino también de la dimensión de la propia planta. Es decir, que el forjado permitiría una mayor separación entre pilares, pero no lo permitiría así la planta del edificio. [...] Por tanto, el hecho de que el prefabricado en sí tenga mayores impactos se debe a que, con el producto comercial existente de menor tamaño, el forjado está sobredimensionado” (López-Mesa, 2012).

En el Inventario de Carbono y Energía (ICE) de la Universidad de Bath (Hammond & Jones, 2008) se proponen como factores de energía y emisión para el hormigón prefabricado 2,0 MJ/Kg y 0,215 KgCO₂/Kg respectivamente. Estos valores son superiores a los registrados por la misma fuente para el hormigón convencional. Coinciden en gran medida con los aportados por Alcorn (2003), también para hormigón prefabricado, respectivamente de 1,9 MJ/Kg y 0,214 Kg CO₂/Kg.

La Tabla T9.19 incluye algunas dosificaciones para hormigones prefabricados proporcionadas por una empresa del sector (Comunicación personal, 2012). En ella se puede observar que se trabaja con relaciones agua / cemento más bajas que en las dosificaciones analizadas para estructuras ejecutadas en obra. Esto implica una mayor cantidad de cemento por m³ y también mayores resistencias que las de los hormigones empleados habitualmente en edificación. Por dosificación, el hormigón prefabricado está más cercano a hormigones de resistencia elevada que al hormigón convencional, y aún así el valor de energía dado por las referencias anteriores sigue siendo notablemente superior; según Hammond & Jones (2011), al hormigón de 50 MPa le corresponderían 1.41 MJ/Kg y 0.212 KgCO₂/Kg. Como indica Belinda López-Mesa, la comparación adecuada es la que se daría entre estructuras diseñadas para soportar las mismas sollicitaciones mecánicas (López-Mesa, 2012).

Dosif.	Cemento (Kg)	Áridos (Kg)	Agua (Kg)	Aditivos (Kg)	Total (Kg)	Relación a/c	f _{ck} (Mpa)
1	400	1825	140	3,5	2368,5	0,35	35 – 55
2	405	1830	149	5,0	2389,0	0,37	45 – 60
3	390	1850	158	4,8	2402,8	0,41	40 – 55
4	405	1835	158	5,2	2403,2	0,39	45 – 60
5	340	1880	150	3,6	2373,6	0,44	25 – 40
6	380	1850	160	4,1	2394,1	0,42	30 – 45
7	320	1890	154	2,5	2366,5	0,48	30 – 45
8	350	1870	148	4,2	2372,2	0,42	30 – 40
9	360	1870	152	4,2	2386,2	0,42	30 – 40
10	400	1830	152	5,0	2387,0	0,38	35 – 45
11	370	1860	156	4,8	2390,8	0,42	35 – 45

Tabla T9.19: Dosificaciones de hormigones prefabricados, referidas al volumen de 1 m³, de una empresa privada.

Sobre los elementos de hormigón prefabricado, el Anejo 13 otorga puntuaciones mayores al empleo de elementos prefabricados que a hormigones preparados o de central de obra. Esta misma tónica se repite en el criterio medioambiental de sistemática del control de ejecución.

9.4.5.- Criterio medioambiental “Optimización del armado” (i=3)

Es el criterio medioambiental cuyo peso en el ISMA es más bajo (3.37%), y valora la utilización de mallazo electrosoldado en losas, el sistema de unión de las armaduras (incentivando el atado frente a la soldadura), el porcentaje de armaduras elaboradas según formas normalizadas (norma UNE 36.831; AENOR, 1997) y la existencia de armaduras activas. Las influencias máximas de estas variables sobre el ICES son también pequeñas, del 2,68% en el mejor de los casos.

Dentro de este criterio, cabe destacar lo siguiente:

- La presencia en las estructuras de mallas electrosoldadas puede estar condicionada por la tipología, no teniendo sentido su empleo, por ejemplo, en estructuras formadas íntegramente por elementos lineales. Valorar positivamente este aspecto implica la discriminación de aquellas estructuras en las que no resulta de aplicación.
- La unión de armaduras mediante soldadura implica un consumo energético (y todas las emisiones a él asociadas) que no existe en el caso de la unión por atado. Es posible, aunque no se ha corroborado con trabajos de campo, que las necesidades de mano de obra sean superiores en el caso del atado. En cualquier caso, la incidencia de este aspecto puede ser mínima en comparación a otras variables consideradas.
- Precisamente una de las variables de este criterio que sí puede jugar un papel relevante en la sostenibilidad de la estructura es la introducción de armaduras activas. Las soluciones

pretensadas pueden suponer un importante ahorro de materiales con respecto a las piezas convencionales de armadura pasiva, con las mejoras ambientales que ello implica.

9.4.6.- Criterio medioambiental “Optimización del acero para armaduras” (i=4)

El Anejo 13 de la EHE-08 otorga un peso del 6.53% del ISMA al criterio medioambiental de optimización del acero para armaduras. En él se valora la posesión de certificaciones medioambientales en el acero (según lo ya indicado en 9.4.2), la certificación de que su producción se ajusta a las exigencias del Protocolo de Kyoto, el empleo de acero reciclado, la reutilización de las escorias siderúrgicas y la realización de controles radiológicos sobre las materias primas.

El protocolo de Kyoto (UN, 1998) compromete a las naciones firmantes del mismo a reducir sus emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero dentro de un horizonte temporal; el CO₂ y el metano, entre otros, se encuentran entre estos gases. Posteriormente, cada Estado debe establecer los instrumentos legales adecuados para el cumplimiento del Protocolo, como ocurre en España con la Ley 1/2005 (Jefatura del Estado, 2005). Esta Ley regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, y se deriva de la Directiva 2003/87/CE (Parlamento Europeo, 2003). Es de obligado cumplimiento para las instalaciones citadas en su ámbito de aplicación (entre las que se incluyen expresamente las plantas siderúrgicas y de producción de clínker). Por lo tanto, la hipotética posibilidad de que un acero fabricado en España no cumpliera con los requisitos indicados en ella implicaría que se trata de un producto fuera de la legalidad. Sí puede darse el caso de que sea importado en nuestro país acero proveniente de naciones no comprometidas con el cumplimiento del Protocolo. Por este motivo, quizás una redacción más apropiada sería *“El acero acredita haber sido producido en un país firmante del Protocolo de Kyoto”*, en lugar de *“El acero acredita mediante la posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido que su producción está sometida a las exigencias del protocolo de Kyoto”*.

La producción del acero a partir de chatarra, al menos en un 80%, puede suponer una influencia máxima en el ICES del 2,54%. En un hormigón con la dosificación estipulada en 9.3.1 y una cuantía de acero reciclado de 50 Kg/m³ (véase tabla T9.2), el acero puede suponer un 20,69% de la energía consumida, un 9,52% de las emisiones totales de CO₂, un 6,28% de las emisiones de NO_x y más del 15% de las emisiones de VOC y SO_x (figuras F9.1 a F9.7).

Este acero procedente de plantas siderúrgicas de horno eléctrico, el más habitual en el mercado español (aunque puede no serlo en el mercado exterior), se asume como 100% reciclado, aunque en realidad se introduzcan pequeñas cantidades de arrabio en el horno para corregir la composición final. En el caso opuesto, representado en la Tabla T9.13, en el cual se empleen armaduras fabricadas a base de acero primario, habría un incremento del consumo energético del 51,53% y un incremento de las emisiones de CO₂ de un 34,63% con respecto al supuesto anterior. Un caso intermedio se contempla en la Tabla T9.14.

Otro aspecto valorado por el Anejo 13 en relación al acero es la reutilización de las escorias, uno de los residuos generados durante su fabricación. El aprovechamiento de las escorias obtenidas durante la producción del acero en más de un 50% constituye como máximo un 1,27% del ICES, como indica la Tabla T9.18. Aunque no se especifica en el Anejo 13, debe tenerse en cuenta que las escorias generadas dependen del proceso empleado en la fabricación del acero. Las escorias producidas en

los hornos altos son las que habitualmente se emplean como cementantes sustitutivos del clinker (CEDEX, 2009), y llevan a una reducción de emisiones de CO₂ derivada de la disminución de la cantidad de clinker empleado. Las escorias generadas en los hornos BOF tienen su principal aplicación como árido en obras civiles (CEDEX, 2007). Por último, en las acerías eléctricas se generan dos tipos de escoria, la negra (en los hornos de arco) y la blanca (en los hornos cuchara en los que se realiza el afino del acero). Las escorias negras se pueden emplear en la industria cementera como aporte de hierro en el horno de clinker, y como árido en obra civil. Las escorias blancas se pueden emplear como sustitutivo de la marga en la fabricación de clinker. En ambos casos las aplicaciones están en fase experimental (CEDEX, 2007b), no disponiéndose por ahora de datos para evaluar su influencia en los aspectos estudiados en este trabajo.

La producción de 1 t de arrabio en un horno alto puede generar hasta 0.4 t de escorias (U.S. EPA, 2010). Procesarlas adecuadamente para su adición al cemento supondría unas emisiones de 0.057 t CO₂, de acuerdo con el factor de emisión de 0.143 Kg CO₂/Kg indicado por Flower & Sanjayan (2007). Si se emplean como sustitutivas de 0.4 t de clinker, se obtendría un ahorro neto estimado (descontadas las emisiones debidas al procesado) en torno a 0.322 t de CO₂. Así, si se considera la producción de 1 t de acero nuevo (2.75 Kg CO₂/Kg; Hammond & Jones, 2008), el reciclaje en la industria cementera del 100% de las escorias generadas en el horno alto evitaría emisiones equivalentes a más del 11% de las correspondientes a la fabricación del acero.

Por último, la realización de controles radiológicos sobre la chatarra externa empleada en plantas siderúrgicas es un aspecto que no solo está relacionado con la dimensión medioambiental, sino también con la seguridad laboral e higiene industrial. Según se ha podido consultar, en la actualidad esta medida es de uso habitual y comúnmente extendido, pero en el pasado se registraron incidentes por contaminación radiactiva en instalaciones españolas (Sánchez, 2012).

9.4.7.- Criterio medioambiental “Sistemática del control de ejecución” (i=5)

Este criterio supone el 9,90% del ISMA (tabla T9.17) y su influencia máxima en el ICES puede llegar al 12,38% (tabla T9.18). Valora la disminución del coeficiente γ_s por adopción de un nivel de control intenso, de acuerdo con lo indicado en el apartado 15.3.1 de la EHE-08. Otorga su mayor puntuación al empleo de hormigón prefabricado con aplicación de dicha reducción. Véanse los comentarios al respecto de la prefabricación en el epígrafe 9.4.4 de este capítulo.

9.4.8.- Criterio medioambiental “Reciclado de áridos” (i=6)

Este criterio supone el 8,91% del ISMA (Tabla T9.17) y su influencia máxima puede ser del 11,14% del ICES (Tabla T9.18). Se ocupa del empleo de residuos de construcción y demolición triturados y empleados como áridos en la producción de hormigón.

De igual modo que el empleo de adiciones en el cemento disminuye la cantidad de clinker necesario, se puede sustituir árido natural, o procedente de machaqueo, por residuos de hormigón, escorias de acería, vidrio troceado u otros. El Anejo 15 de la EHE define como hormigón reciclado (HR) al fabricado con árido grueso reciclado procedente del machaqueo de residuos de hormigón. Este Anejo permite, sin la necesidad de ensayos de laboratorio, un contenido máximo de árido reciclado del 20%

en peso sobre el contenido total de árido grueso, considerando que hasta ese límite no existen alteraciones significativas en las propiedades del hormigón. Para contenidos mayores del 20% se obliga a la realización de estudios y experimentaciones complementarias para cada aplicación. El empleo de áridos reciclados queda restringido a hormigón en masa y a hormigones armados de resistencia característica inferior a 40 N/mm^2 , quedando excluido en el hormigón pretensado.

En el epígrafe 3.4.1.3 de la referencia CEDEX (2009b) se hace referencia a las propiedades del hormigón reciclado, que se reseñan brevemente a continuación.

La demanda de agua del hormigón reciclado es mayor que la del hormigón convencional, así como también es mayor el consumo de cemento para una misma resistencia característica. La densidad y la resistencia a la compresión resultan ligeramente inferiores, alcanzando una disminución del 10-20%, en ambos aspectos, cuando el porcentaje de sustitución del árido grueso es del 100%. Cuando la sustitución es alta las alteraciones son mayores en el módulo de elasticidad (que tiende a disminuir) y en la retracción y la fluencia (que tienden a aumentar). En ambos casos la magnitud de las variaciones es mayor si se sustituye también el árido fino. Aumentan también la absorción y la porosidad, mientras que la resistencia al hielo-deshielo depende de las propiedades del hormigón original, en ese sentido. En la referencia citada anteriormente y en Berndt (2009), se puede encontrar más información al respecto.

Las emisiones debidas a la demolición de una estructura y al reciclaje de su hormigón en áridos, sin incluir transporte, son cifradas en $0.00148 \text{ KgCO}_2/\text{Kg}$ por Collins (2010), encontrándose en el orden de magnitud de las emisiones determinadas en el Capítulo 6 para la producción de áridos en canteras. Esto es lógico, porque los procesos y el tipo de maquinaria a emplear en un caso y en otro son similares. En este sentido, el beneficio ambiental se encontraría principalmente en la reutilización de materiales destinados inicialmente a vertedero; un aspecto adicional es que se puede conseguir una disminución de los procesos de transporte, si los áridos producidos de este modo se reutilizan en una nueva obra a ejecutar en la misma ubicación.

9.4.9.- Criterios medioambientales “Optimización del cemento” (i=7) y “Optimización del hormigón” (i=8)

La producción de cemento es el proceso que contribuye de forma más amplia al balance de consumo energético y emisiones contaminantes dentro del ciclo de vida del hormigón. Según se recoge en la Tabla T9.2 y en las figuras F9.1 a F9.7, para un hormigón con la dosificación indicada en la Tabla T9.1 ($341,7 \text{ kg cemento} / \text{m}^3$), la producción del cemento supone, de media, un 61,18% del consumo energético total, un 81,21% de las emisiones de CO_2 , un 59,61% de las emisiones de NO_x , un 71,69% de las emisiones de CO, un 26,08% de las emisiones de VOC, un 79,32% de las emisiones de SO_x y un 48,87% de las emisiones de partículas PM_{10} . Como se indica detalladamente en el Capítulo 4, el principal foco de consumo energético son los combustibles empleados para calentar el horno de producción de clínker hasta su temperatura de trabajo (entre 1400 y 1500 °C). La mayoría de las emisiones proceden, además de la combustión, del proceso de descarbonatación de la materia prima que tiene lugar en el horno.

Las cifras anteriores no dejan lugar a dudas: la pretensión de mejorar el comportamiento ambiental del hormigón pasa, invariablemente, por hacer lo propio con el cemento. El impacto ambiental de la producción de cemento puede disminuirse de varias formas, si bien es cierto que en diferente cuantía.

El criterio medioambiental de “Optimización del cemento” (13,50% del ISMA; Tabla T9.17) valora las principales opciones. Sobre la valoración de la posesión de certificaciones ambientales, es de aplicación lo comentado en el epígrafe 9.4.2 de este capítulo, mientras que los comentarios aplicables al cumplimiento del Protocolo de Kyoto son los mismos que lo ya recogidos para el acero en el epígrafe 9.4.6.

Por otro lado, también se va a hablar aquí del criterio medioambiental “Optimización del hormigón” (4,60% del ISMA; Tabla T9.17), ya que los aspectos estudiados en él son muy similares a los del criterio de optimización del cemento.

En ambos criterios, al margen de la posesión de certificaciones medioambientales y de calidad, se valora el empleo de materiales cementantes suplementarios como sustitutivos del clinker en la producción de cemento, o como adición directa a cementos del tipo CEM I, en la producción de hormigón.

Dado que la mayor parte de los consumos energéticos y emisiones del cemento se deben a la producción del clinker, reduciendo el contenido de éste en el cemento es posible disminuir el impacto global del producto final.

Existen materiales sustitutivos del clinker (materiales cementantes suplementarios), que no requieren pasar por el proceso pirolítico que tiene lugar en el horno. Generalmente son residuos o subproductos de otros procesos industriales. Es éste el caso de las cenizas volantes, la escoria granulada de alto horno o el humo de sílice. Otros sustitutivos son de origen mineral (*filler* calizo, puzolanas naturales de origen volcánico, metacaolín, esquistos calcinados) o vegetal (ceniza de cáscara de arroz).

Los porcentajes de sustitución varían según el tipo de adición y las propiedades del cemento, pudiendo llegar a ser elevados, y su influencia en las propiedades del cemento puede mejorar aspectos como la resistencia, la durabilidad o la trabajabilidad (Berndt, 2009; Glavind, 2009; CEDEX, 2007, 2007b, 2009, 2009c, 2009d). Los valores de energía y adiciones asociados al empleo de adiciones son muy bajos, debido a su naturaleza de subproductos industriales. Los consumos que aparecen se deben, en su caso, al procesado y al transporte.

En el epígrafe 9.3.2 de este capítulo se ha analizado un supuesto práctico en el que se comparan el consumo energético y las emisiones de CO₂ de cementos de tipo CEM I (95% clinker) y CEM II (con un 16% de adiciones, formadas por cenizas volantes y caliza) producidos en la misma planta.

La sustitución parcial de clinker por estos materiales permite pasar de un consumo energético de 4,92 MJ/kg en el CEM I a 3,92 MJ/kg en el CEM II (una disminución del 20,4%), y de 0,916 kg CO₂/kg a 0,715 kg CO₂/kg respectivamente (disminución del 21,9%).

Según Hammond & Jones (2008), el cemento portland genérico supone un consumo energético de 4.6 MJ/Kg y unas emisiones de 0.83 KgCO₂/Kg (valores similares a los obtenidos en el Capítulo 4). La

energía baja a 3.52 y 2.43 MJ/Kg cuando, respectivamente, se sustituye un 25 y 50% del clinker por cenizas volantes. Las emisiones correspondientes serían de 0.62 y 0.42 KgCO₂/Kg.

En el estudio de Nisbet et al. (2000), las dosificaciones RM3, RM4 y RM5 tienen la misma resistencia característica (3000 psi) pero diferente porcentaje de sustitución de cenizas volantes (0%, 15% y 20%). Se mantiene siempre la misma cantidad total de material cementante (la suma de cemento y cenizas volantes tiene un valor constante en las tres dosificaciones). Los consumos energéticos son de 0.734, 0.658 y 0.632 MJ/Kg, y las reducciones correspondientes del 10.5 y 14%. En emisiones se pasa de 0.097 a 0.085 y 0.081 KgCO₂/Kg, observándose también reducciones en la emisión de partículas de SO₂ y NO_x.

Flower & Sanjayan (2007) estudian hormigones de 25 y 32 MPa con sustituciones de 25% de cenizas volantes, obteniendo reducciones en la emisión de CO₂ del 13% para el hormigón de 25 MPa y del 15% para el hormigón de 32 MPa.

Cuando se utilizan escorias de horno alto como sustitutivas del clinker, las reducciones de energía y emisiones son ligeramente inferiores a las que corresponderían a una sustitución por cenizas volantes en el mismo porcentaje; la escoria necesita un mayor procesamiento para su empleo, debido a su granulometría; véase CEDEX (2009). En cualquier caso, se sigue una tónica similar. Según los datos de Hammond & Jones (2008), indicados anteriormente, partiendo de un cemento con consumo de energía de 4.6 MJ/Kg y emisiones de 0.83 KgCO₂/Kg, se puede bajar, respectivamente, hasta 3.81 y 3.01 MJ/Kg, y hasta 0.64 y 0.45 KgCO₂/Kg, para sustituciones del 25 y 50% del clinker. Flower & Sanjayan (2007) indican que la naturaleza de las escorias siderúrgicas permite emplear porcentajes de sustitución más elevados sin alterar las propiedades del hormigón de forma significativa. Estos autores refieren una disminución de energía y emisiones de un 22% en hormigones con un 40% de escoria siderúrgica.

Según la Tabla T9.18, la máxima influencia del empleo de materiales sustitutivos del cemento en el valor final del ICES es de hasta un 8,64% cuando el porcentaje de adiciones se encuentra por encima del 20%. Cuando se considera la adición directa al hormigón de cenizas volantes o humo de sílice, la influencia máxima en el ICES de estas variables puede llegar al 5,74%.

Un aspecto ambiental adicional es la reducción de materiales destinados a vertedero, que sería el final del recorrido para cenizas o escorias, de no emplearse en la industria del cemento. Según el CEDEX (2009c), la producción de cenizas volantes en las 19 centrales térmicas en operación en 2005 ascendió a 6.388.000 t. De ellas, el sector cementero empleó 4.021.000 t, mientras que una pequeña cantidad adicional se empleó directamente en el hormigón. Según el propio CEDEX (2009), la producción de escorias de horno alto en ese mismo año fue de 1.283.000 t, las cuales se reutilizaron en su totalidad.

El otro aspecto valorado en el criterio de "Optimización del cemento" es el empleo de combustibles alternativos o la valorización de residuos como combustible, que puede suponer hasta un 2,63% del valor total del ICES, en el escenario de máxima influencia. En el epígrafe 9.3.2 de este capítulo también se ha estudiado la influencia sobre las emisiones de CO₂ de una sustitución parcial de combustible fósil por biomasa. Cuando esta sustitución es del orden del 15% de la energía térmica total, las emisiones se reducen un 5,50% en la producción de cemento y un 4,49% en el conjunto del hormigón, para la dosificación y armados supuestos en la Tabla T9.2.

9.4.10.- Criterio medioambiental “Control de impactos” (i=9)

Este criterio valora la generación de polvo y partículas y la adopción de medidas correctoras. El Anejo 13 trata la producción de polvo en referencia exclusivamente a la obra, valorando las posibles medidas para su reducción: pavimentación de accesos, limpieza de neumáticos, riego mediante aspersores, empleo de estabilizantes químicos, toldos, pantallas. El peso de este criterio en el ISMA es elevado (10%) y la máxima influencia en el ICES de cada una de las 5 variables contempladas es de un 2.6%.

Por el tipo de medidas correctoras indicadas, se entiende que se considera la generación de polvo en un tipo de obra determinado, relacionado con movimientos de tierras y más propio de la obra civil o de nuevas edificaciones, que puede no ser de aplicación en otros casos (reparaciones, modificaciones o ampliaciones de estructuras existentes, entre otros). Por otra parte, hay que destacar que se contemplan únicamente este tipo de impactos asociados a la obra. Como se ha visto en 9.3.2 (Tabla T9.2, Figura F9.7), los procesos de producción de cemento y áridos suponen un altísimo porcentaje de las emisiones de partículas asociadas al hormigón, debido a la extracción de materiales de canteras, a las que sí resultarían de aplicación, en general, las medidas correctoras indicadas en el Anejo.

9.4.11.- Criterio medioambiental “Gestión de los residuos” (i=10)

El criterio medioambiental de gestión de residuos valora el control y reciclaje de los productos de excavación y de los residuos de construcción y demolición, así como la minimización del empleo de probetas cúbicas que incluyen un refrentado con azufre. Es el criterio con mayor peso en el ISMA (20,10%, Tabla T9.17) y, dentro de sus variables, la gestión de los residuos de construcción y demolición puede representar hasta un 15,23% del ICES, lo cual supone una contribución muy elevada.

Las puntuaciones más altas corresponden a la opción de reciclar la totalidad de los residuos de excavación y de construcción o demolición. El reciclaje de residuos en la propia composición del hormigón ya se ha tratado en el criterio correspondiente; se aprovecha este epígrafe para tratar el papel del hormigón (especialmente cuando termina su vida útil) como sumidero de CO₂, aun cuando el Anejo no lo contempla específicamente.

Además del ahorro en el consumo de áridos nuevos y de la reutilización de un material que en otro caso iría destinado a vertedero, existe un aspecto positivo adicional en el reciclaje de residuos de hormigón, al haberse comprobado que el hormigón captura CO₂ atmosférico a lo largo de su vida útil. Este fenómeno se conoce como carbonatación. Consiste en el avance de la reacción inversa a la descomposición del carbonato cálcico durante la calcinación. Mediante este mecanismo, el CO₂ presente en la atmósfera se difunde en el interior del hormigón y se combina con el CaO para dar lugar a CaCO₃, revirtiendo el hormigón a su estado inicial de caliza. Durante esta reacción, que ocurre de forma lenta y en función de la superficie de hormigón expuesta al ambiente, se provoca una disminución del pH. Esta pérdida de alcalinidad desestabiliza los productos de hidratación del

cemento y propicia la corrosión de las armaduras. Por este motivo, en principio la carbonatación se estudió como una patología, ya que afectaba negativamente a la durabilidad.

Existen varios estudios acerca de la carbonatación y su capacidad para capturar el dióxido de carbono atmosférico (Kjellsen et al., 2005; Pade & Guimaraes, 2007; Collins, 2010). Uno de los factores que incrementan la tasa de captura es la superficie de hormigón en contacto con el ambiente exterior. Esta superficie se incrementa a medida que se trituran los elementos estructurales para transformarlos en áridos, ocasionando que la captura de CO₂ sea mucho mayor por parte de los residuos de hormigón reciclados que durante la vida primaria de una estructura.

Al haber sufrido un proceso de machaqueo hasta alcanzar la granulometría deseada, la superficie de exposición del hormigón reciclado se incrementa en gran medida. En una estructura de hormigón la carbonatación es indeseada y se pueden tomar medidas para controlarla o evitarla. Sin embargo, en aplicaciones no estructurales o carentes de armaduras no es problemática, y en determinados casos la cantidad de CO₂ retirado del ambiente a lo largo de su ciclo de vida puede ser significativa.

Collins (2010) ha realizado estudios con varios hormigones, empleados para fabricar una viga de un puente con una vida útil de 70 años. Las emisiones inventariadas por el autor, debidas a la producción de los componentes, procesado del hormigón y puesta en obra, resultan ser de 434,4 KgCO₂/m³ (aproximadamente 0,181 KgCO₂/Kg). Durante las siete décadas de vida primaria de este hormigón, y teniendo en cuenta las condiciones ambientales y el área de exposición de la viga, se determina que la cantidad total de CO₂ capturado asciende a 4,6 Kg CO₂/m³. Esto supone poco más de un 1% de las emisiones generadas.

Alternativamente, se considera el reciclaje del hormigón de la viga, tras su demolición y machaqueo (1,9 Kg CO₂/m³), empleando el árido resultante como sub-base de la capa de rodadura de una vía, durante una vida secundaria de 30 años. En este caso la cantidad de CO₂ capturado durante esta segunda etapa asciende a 136,2 Kg CO₂/m³ (un 31% del generado inicialmente).

El autor no tiene en cuenta, a la hora de calcular el CO₂ generado, la contribución del acero (que para 50 Kg/m³ de acero reciclado supondría el 5.5% de las emisiones totales), ni de los transportes de materiales (11% de las emisiones totales). Incluyendo estas estimaciones, la captura del 31% del CO₂ inventariado por el autor equivaldría al 26% de las emisiones totales.

Se contempla en dicho estudio otra opción: el empleo del árido reciclado en la construcción de elementos para un dique portuario. En este caso la superficie expuesta al ambiente exterior es menor, al estar los áridos hormigonados en bloques, y la captura es también menor (85.7 Kg CO₂, un 16.8% del total), pero sigue siendo considerablemente significativa.

El estudio de Collins (2010) incluye también hormigones con diferentes porcentajes de adiciones. Reciclándolos de esta forma, la cantidad total de CO₂ capturado es menor a medida que disminuye el contenido en clinker portland; esto era de esperar, pues los materiales cementantes suplementarios no sufren descarbonatación y no presentan el fenómeno de captura. A pesar de lo anterior, porcentualmente el resultado es mejor, ya que la cantidad de CO₂ emitida también disminuye notablemente.

En este sentido, puede afirmarse que una gestión adecuada de los residuos de hormigón puede traducirse en una mejora ambiental significativa.

9.4.12.- Criterio medioambiental “Gestión del agua” (i=11)

La contribución del agua al consumo energético y a las emisiones de CO₂ en el ciclo de vida del hormigón es despreciable frente a otros factores intervinientes (estaría entre el 0.1 y el 0.01% de las emisiones totales, según los factores tomados de la referencia Yan et al. (2010). Su inclusión en el Anejo 13 no se debe a estos aspectos sino al propio impacto ambiental que supone el consumo de un recurso escaso y la generación de vertidos líquidos contaminados. El Anejo 13 valora con 9.9% del ISMA la adopción de medidas específicas para el ahorro de agua. Dentro de este criterio, la variable con mayor posibilidad de influencia, según Gómez (2012), es la posesión de un distintivo ambiental por parte de la empresa constructora, con hasta un 16.1%; aquí aparece lo que podría ser un error de transcripción, al indicarse ISO 9001 en lugar de ISO 14001. Las tres variables restantes se refieren al ahorro y reutilización de agua durante la puesta en obra del hormigón, no valorándose el mayor o menor consumo durante los procesos industriales de fabricación del mismo.

A pesar de que la percepción de este problema en los países más desarrollados pueda ser poco relevante, el agua es un recurso escaso en el planeta. La escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial, cifra que se espera que aumentee, como resultado del cambio climático. Se estima que al menos una de cada cuatro personas se verá afectada por escasez recurrente de agua para 2050 (PNUD, 2006, 2017). Por ello, su peso en un modelo de sostenibilidad no debe ser pequeño.

9.5 ESTUDIO DE LOS ASPECTOS ECONÓMICOS EN EL ANEJO 13 DE LA EHE

El Anejo 13 aborda el estudio de la vertiente económica de la sostenibilidad desde un punto de vista muy simplificado, introduciendo en la formulación principal del ICES (Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad) un factor de extensión de vida útil designado por b .

$$ICES = a + b \cdot ISMA \quad [E2.1]$$

El coeficiente b valora que la estructura se haya diseñado para alcanzar una vida útil superior a la mínima establecida en la EHE (véase Tabla T8.6 del Capítulo 8 de esta Tesis), quedando limitado a un valor máximo de 1,25.

$$b = \frac{t_g}{t_{g,\min}} \leq 1,25 \quad [E9.1]$$

Según Gómez (2012), durante la redacción del Anejo 13 se decidió esta limitación teniendo en cuenta que la instrucción ya resulta exigente en materia de durabilidad, y se deseaba evitar que estructuras con bajos niveles de cumplimiento en aspectos medioambientales y sociales viesen excesivamente beneficiado su ICES a causa de la prolongación de su durabilidad.

A pesar de ello, del análisis de sensibilidad se desprende que la influencia máxima de esta variable en el ICES es del 20,00%, lo que la convierte en la de mayor relevancia de todo el Anejo 13.

En el Capítulo 8 se ha discutido sobre los aspectos económicos de la sostenibilidad en las estructuras de hormigón, apareciendo la durabilidad como un aspecto fundamental en la valoración del desempeño económico, debido a que el incremento del periodo en servicio o vida útil de la estructura implica, por lo general, una reducción de los costes anuales equivalentes. No obstante, en base a las conclusiones de dicho capítulo se pueden establecer varios comentarios en torno al papel del factor económico en el Anejo 13 la EHE:

- Existen otros factores de importancia en el aspecto económico que no son tenidos en cuenta en la EHE, como es el análisis de costes.
- En estructuras con bajos requerimientos de vida útil, como pueden ser las estructuras provisionales o temporales, el incremento de la durabilidad puede carecer de sentido práctico. En su lugar, podría ser valorable la aptitud de las estructuras para el reaprovechamiento o la reutilización.
- La extensión de la vida útil se valora de un modo estrictamente numérico, evitando profundizar en los métodos o estrategias que permiten llevarla a cabo. Se encuentra que sería recomendable establecer una valoración de esta estrategia en función de las necesidades de cada caso (tipo de estructura, clase de exposición ambiental) con mayor nivel de detalle, empleando un sistema análogo al desarrollado para el estudio de los factores ambientales.

- El impacto de la mejora de la durabilidad debería estar vinculado a la probabilidad de que la estructura finalice su periodo de servicio antes de lo que establece su proyecto, por causas ajenas al deterioro estructural.

Las consideraciones anteriores serán tenidas en cuenta en el capítulo siguiente para la elaboración de la rama económica del nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad.

9.6 ESTUDIO DE LOS ASPECTOS SOCIALES EN EL ANEJO 13 DE LA EHE

El anejo 13 aborda el estudio de los aspectos sociales de la sostenibilidad por medio del denominado coeficiente de contribución social, designado por a , que se introduce como sumando en la expresión que define el ICES [E2.1]. Este coeficiente de contribución social procede del sumatorio de los coeficientes correspondientes a cinco subcriterios, según la expresión [E9.2].

$$a = \sum_{i=1}^{i=5} a_i \quad [E9.2]$$

Una particularidad de este coeficiente es que contempla diferentes puntuaciones en función de si la contribución a la sostenibilidad se está evaluando en la fase de proyecto o en la fase de ejecución de la estructura.

Para Gómez (2012) esta diferenciación no resulta aceptable. Por un lado porque de alguna manera se está fomentando o incentivando la existencia de diferencias entre lo proyectado y lo realmente ejecutado, lo cual es, en general, inevitable, aunque no por ello debe ser una situación trasladada a la normativa. Por otra parte, esta diferenciación entre ejecución y obra afecta únicamente a los aspectos sociales, si bien las diferenciaciones existentes serían aplicables también en los criterios ambientales y económicos. Por tanto, la introducción de esta doble puntuación implica una cierta incoherencia en la formulación.

En este sentido, se propone el desarrollo de un único índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad, que sería evaluable según los mismos parámetros tanto para lo proyectado ($ICES_{\text{proyecto}}$) como para lo realmente ejecutado ($ICES_{\text{ejecución}}$), verificándose la condición deseable de que:

$$ICES_{\text{ejecución}} \geq ICES_{\text{proyecto}} \quad [E9.3]$$

Dicho de otro modo, las condiciones de lo realmente ejecutado, en lo que a sostenibilidad se refiere, no deberían empeorar con respecto a lo contemplado en proyecto.

Los aspectos valorados por los coeficientes a_i son los siguientes:

- Empleo de métodos innovadores resultado de proyectos I+D+i realizados en los 3 años anteriores (a_1 , sensibilidad máxima del ICES con respecto a este parámetro: 2,00%).
- Formación específica del personal que participa en la ejecución de la obra (a_2 , sensibilidad máxima: 2,00%).
- Adopción de medidas de seguridad y salud adicionales a las establecidas reglamentariamente (a_3 , sensibilidad máxima: 4,00%).
- Transparencia hacia el ciudadano, por medio de la elaboración de una página web informativa, acerca de la obra y de sus características (a_4 , sensibilidad máxima: 2,00%).

- Declaración de la obra como de interés general por parte de la Administración (a₅, sensibilidad máxima: 4,00%).

Con carácter general, puede comentarse que los cinco aspectos considerados se encuentran entre los indicadores de sostenibilidad social reseñados por la bibliografía consultada (tal y como se resume en el Capítulo 2). Dos de los criterios (innovación y transparencia) forman parte de lo que podría considerarse la dimensión externa de la empresa (o su interrelación con la sociedad), mientras que otros dos (formación y seguridad) se refieren a la dimensión interna (relación con sus propios empleados). El último (declaración de interés general de la obra) forma una categoría aparte, al estar relacionado con el ámbito institucional.

Si bien el establecimiento de estas categorías se puede considerar acorde a lo establecido por las publicaciones consultadas (Labuschagne & Brent, 2006; Jorgensen et al., 2008), se echa en falta un mayor número de indicadores que permitan obtener una imagen más fiel del desempeño social de la estructura.

No se valora el nivel de creación de empleo, que como se ha visto en este capítulo resulta el aspecto que mayor preocupación social genera en la actualidad. En principio se encuadraría dentro del nivel interno de la empresa, ya que supone el núcleo de su política de recursos humanos, si bien es un parámetro con una influencia muy marcada a nivel externo. Junto a él se deberían encontrar indicadores que valoren la calidad del empleo generado, relacionados con la temporalidad del mismo, con el nivel de cualificación de los trabajadores, así como con la igualdad de oportunidades entre hombres y mujeres. Entre los aspectos que sí reseña el Anejo, la valoración de que se adopten medidas de seguridad y salud adicionales a las reglamentariamente establecidas puede resultar un tanto confuso o incluso contraproducente, habida cuenta que la prevención de riesgos laborales es un sector altamente legislado y que ya cuenta con un gran número de disposiciones normativas en vigor. Quizás sería preferible vincular este indicador al cumplimiento de objetivos en materia de prevención.

En cuanto a los aspectos propios de la relación de la empresa con el entorno, en los que se valoran la transparencia y el apoyo a la investigación y a la transferencia tecnológica, se podrían añadir indicadores que valorasen los impactos positivos de la actividad empresarial en la comunidad local en la que se asienta, por medio de la contratación de mano de obra y la adquisición de materiales en el entorno próximo de la obra, así como el desempeño de la empresa en materia de responsabilidad social corporativa, por ejemplo, apoyando o patrocinando iniciativas socioculturales, deportivas, o de disminución de diferencias sociales, entre otras. También podría ser un aspecto a tener en cuenta el que sea posible demostrar un origen responsable de los materiales empleados, en particular para aquellos procedentes de fuera de la UE. Este origen responsable está relacionado con la inexistencia de prácticas abusivas, indignas o deshonorosas, tanto en aspectos laborales como sociales y ambientales, a lo largo de la cadena de valor del producto, y especialmente en los primeros escalones de la misma. En la actualidad hay organizaciones de prestigio que certifican determinados aspectos de algunos productos, como la madera (certificaciones FSC y PEFC). En lo relativo al sector del hormigón, recientemente se han denunciado casos como el del mercado ilegal de arena procedente de Marruecos con destino a las Islas Canarias (Querouil, 2015).

En todos los aspectos anteriores se alude al comportamiento de la empresa; el Anejo 13 hace referencia a la empresa constructora. Como se ha mostrado a lo largo de esta Tesis y en este mismo capítulo, en la construcción de una estructura de hormigón intervienen diferentes tipos de empresa,

según el proceso a considerar: fabricantes de cemento, acero y áridos, ferrallistas, plantas de hormigón preparado, constructores, transportistas. A su vez, puede haber más de una empresa de cada tipo; por ejemplo, los subcontratistas del contratista principal, o la adquisición de cemento u hormigón a varios proveedores diferentes en una misma obra. Por tanto, una correcta evaluación de los aspectos sociales debería realizarse de forma individualizada, para cada empresa participante.

Dentro de un mismo grupo o nivel de empresas (por ejemplo, entre los diferentes fabricantes de cemento que aportan su producto al hormigón empleado en la obra), podría ponderarse la puntuación de cada una por medio de su porcentaje de participación. Para establecer una ponderación entre diferentes grupos o niveles de empresas, puede resultar de ayuda el análisis efectuado en el Capítulo 8 acerca del impacto de cada proceso sobre la generación de empleo total. En este sentido las empresas constructoras serán las más relevantes, tal y como considera el Anejo 13, pero el papel de las empresas dedicadas a la elaboración de armaduras también resulta fundamental. En cambio, quedan mucho más lejos los fabricantes de componentes o las plantas de hormigón preparado. Estas ideas, por ahora brevemente expuestas, constituirán la base para desarrollar la parte social del nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad que se presentará en el capítulo siguiente.

9.7 SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En lo referente a los aspectos ambientales considerados en el Anejo 13, pueden señalarse como ideas principales las siguientes:

- La producción de cemento es el proceso con mayor impacto ambiental, con diferencia, de todos los que intervienen en la creación de una estructura de hormigón. Las variables relacionadas con procesos de fabricación más limpios, en particular el empleo de adiciones como sustitutivos del clinker y la utilización de combustibles alternativos a los de origen fósil, merecerían un peso muy superior al que actualmente tienen en el Índice de Sensibilidad Medioambiental.
- El acero también es un componente básico con un impacto ambiental elevado, siendo el empleo de acero reciclado un factor clave en el perfil ambiental del hormigón. En los aceros corrugados producidos en España está generalizado su uso, pero en productos importados sí podría darse el caso de encontrar acero primario. Por este motivo, la relevancia de esta variable debería de ser superior a la actual.
- La actual versión del Anejo 13 otorga a las distancias de transporte una importancia que también resulta marcadamente inferior al papel que juegan en cuanto a consumos energéticos y emisiones contaminantes, según las estimaciones realizadas en esta Tesis. Además, el Anejo considera únicamente una parte de los procesos de transporte que intervienen. Podría ser de interés el tratamiento del transporte como variable de tipo continuo.
- Como opciones de diseño, el empleo de soluciones pretensadas y de elementos prefabricados se configuran como alternativas de impacto positivo, al reducir el consumo específico de materiales en relación a las prestaciones obtenidas.
- En el extremo contrario a las variables anteriores, el Anejo 13 otorga una valoración probablemente excesiva a la posesión de certificaciones ambientales y a la gestión de residuos, dos aspectos importantes pero cuya incidencia sobre los parámetros ambientales estudiados es marcadamente menos directa que en los casos precedentes.

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

Por lo que respecta a los aspectos económicos, la principal conclusión es la necesidad de incluir en el modelo de evaluación de la sostenibilidad otros aspectos al margen de la extensión de vida útil, único contemplado en la redacción actual del Anejo 13, y al que no solo no se niega una gran importancia, sino que se estima que se debería profundizar en su análisis por medio de un desarrollo más elaborado. Dicho desarrollo podría incluir el análisis de costes del ciclo de vida de la estructura, contemplándola como el estudio de un proyecto de inversión, y la introducción de consideraciones alternativas a la durabilidad, como es el caso de determinados aspectos a valorar cuando no tiene sentido esforzarse en la extensión de la vida de los materiales.

Del estudio de los aspectos sociales es posible concluir que, si bien las cinco variables incluidas actualmente en el Anejo 13 son efectivamente relevantes en este sentido, esta parte del modelo adolece de falta de completitud. Para obtener una evaluación más representativa del desempeño social de la estructura convendría incluir variables como la generación de empleo y su calidad, el impacto socioeconómico en el entorno inmediato de la estructura o las actuaciones en materia de responsabilidad social corporativa. Además, es necesario reformular el modelo para permitir que los aspectos anteriores se evalúen para cada empresa que intervenga en el proceso, y estas valoraciones se ponderen de acuerdo a la relevancia de cada parte, para incorporarse a un índice global. Además, sería conveniente modificar la definición y manera de medir lo relativo a la seguridad laboral.

CAPÍTULO 10: NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

CAPÍTULO 10: NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

10.1 INTRODUCCIÓN

En el Capítulo 2, relativo a lo esencial del estado del arte, se han introducido brevemente los conceptos básicos sobre evaluación de la sostenibilidad, impacto ambiental, desempeño económico y aspectos sociales necesarios para abordar el desarrollo de la presente Tesis. También se presenta en dicho capítulo la estructura básica del modelo de sostenibilidad incluido en la EHE 08 (Anejo 13).

En los capítulos 4 a 7, relacionados con el análisis del consumo energético y de las emisiones contaminantes asociados al cemento, acero, áridos y al conjunto del hormigón estructural, se ha estudiado en detalle el impacto ambiental generado por una estructura de hormigón, empleando herramientas propias del análisis de ciclo de vida (ACV). Se han empleado como indicadores el consumo de energía primaria y las emisiones atmosféricas de CO₂ y de otras cinco sustancias contaminantes. Por razones obvias, en el Capítulo 7 se han integrado los desarrollos de los capítulos 4 a 6.

En el Capítulo 8, relativo al análisis y consideraciones de base relativas a aspectos económicos y sociales, se ha estudiado la relación de las estructuras de hormigón con los dos restantes pilares de la sostenibilidad.

En el Capítulo 9 se ha realizado un análisis crítico del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la instrucción española de hormigón estructural EHE-08. Dando continuidad a la parte final del Capítulo 7 en este capítulo se han estudiado varios casos prácticos, desde el punto de vista ambiental, analizándose en profundidad el modelo de evaluación de la sostenibilidad de la EHE 08, confrontando la importancia que tiene cada aspecto del mismo con la que resulta de la realización de análisis de ciclo de vida, previamente abordados en esta Tesis. También se han analizado los aspectos sociales y económicos tratados en la EHE-08. Quedan así cubiertos los objetivos (i) y (ii) propuestos en el apartado 1.2 del Capítulo 1 (Relevancia, utilidad y formulación de la Tesis), relativos a analizar la adecuación y completitud de los aspectos ambientales, económicos y sociales contemplados por la EHE 08.

Partiendo de todos estos antecedentes, en este capítulo se aborda el tercer objetivo de la Tesis, consistente en la propuesta de un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón.

Una primera aproximación a un nuevo modelo estuvo basada en la formulación de propuestas de mejora al actual Anejo 13, detectando sus deficiencias y proponiendo modificaciones en redacción, puntuaciones o funciones de valor, con vistas a obtener una segunda versión más depurada. Este enfoque fue empleado por Gomez (2012) como base a la construcción de modelos no deterministas de evaluación.

Tras los estudios realizados inicialmente, en especial en el ámbito medioambiental, se contempló la posibilidad de desarrollar un modelo completamente nuevo, basado exclusivamente en indicadores procedentes de análisis de ciclo de vida. La complejidad de esta opción era excesiva para el técnico

normal, al ser necesario emplear datos y herramientas con los cuales están poco o nada familiarizados la mayoría de los técnicos dedicados al sector de la construcción. Basar el modelo en resultados del tipo $XX \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ó $YYYY \text{ €/m}^3$ presenta también la dificultad añadida de tener que establecer valores de referencia con los que compararlos, para que la información obtenida tenga sentido (Kumar et al., 2009).

Se ha optado por una solución intermedia entre las dos anteriores: un modelo que conserva en gran parte el planteamiento del Anejo 13, empleando variables fácilmente conocibles o identificables por técnicos no expertos en sostenibilidad, pero en el cual la selección de variables y su ponderación sí obedecen a los resultados del análisis del ciclo de vida del hormigón.

El modelo planteado aporta un índice del mismo tipo que el actual, que también se ha llamado Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES). En su determinación intervienen el Índice de Sensibilidad Medioambiental (ISMA), que recibe una nueva estructuración, y dos nuevos índices relativos a las vertientes económica (Índice de Sensibilidad Económico, ISE) y social (Índice de Sensibilidad Social, ISS). En los dos índices de nueva creación se ha procurado incluir un número de criterios y variables mayor que en el modelo existente, para ajustar su evaluación a las conclusiones obtenidas en los capítulos anteriores.

No obstante, también se ha observado que existen una serie de datos numéricos, procedentes del análisis de ciclo de vida (ACV) de la estructura desde el punto de vista de la sostenibilidad, que pueden aportar una información importante al responsable de la toma de decisiones (técnico, constructor, promotor, etc.). Es el caso del consumo energético total atribuido a la estructura, su impacto contaminante, el coste total, el coste anual, o el volumen de mano de obra generada. No es sencillo establecer referencias para vincular directamente estos parámetros a los índices de sostenibilidad; entre otros motivos, el amplio espectro de las obras cubiertas por la EHE dificultaría este punto, al no ser comparables en estos términos estructuras de edificación convencional con obras civiles o industriales, por ejemplo. Sin embargo, sí pueden servir para comparar entre sí dos alternativas concretas para el mismo propósito, complementando la información adimensional ofrecida por el ICES. Por este motivo, se ha decidido incluir también un Grupo de Indicadores Complementarios que aporte este valor añadido al modelo. A pesar de que este asunto se sale del alcance de esta Tesis, con estos datos numéricos se tiene todo lo necesario para construir un modelo mixto del tipo ACV-MIVES, en el cual se use MIVES para obtener un índice global de sostenibilidad empleando los resultados numéricos del correspondiente ACV.

En los epígrafes siguientes se detalla el nuevo modelo propuesto, por medio de la definición completa de sus elementos. Además de los criterios, variables y puntuaciones asociadas a los mismos, ha sido necesario establecer los diferentes coeficientes de ponderación y los parámetros que dan forma a las funciones de valor de cada indicador. En ambos casos la elección de los parámetros se ha realizado tras un debate de las alternativas posibles entre el autor y los directores de la Tesis, en base a todos los antecedentes existentes, en la forma de trabajos previos realizados por el doctorando, resultados de la literatura existente, y entrevistas personales con expertos del sector. Para la definición de las funciones de valor se ha empleado la herramienta informática MIVES (UPC, 2014), de la que se han tomado las capturas de pantalla que ilustran el capítulo.

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. De hecho, como se ha comentado, esta Tesis incluye todo lo necesario para construir un modelo mixto del tipo ACV-MIVES.

En otro orden de cosas, es importante reseñar que el modelo aquí presentado no está necesariamente pensado para un entorno normativo. Se trata de un modelo de aplicación general.

Finalmente, en paralelo con el presente trabajo se ha estado desarrollando el nuevo Código Estructural español, que va a seguir los eurocódigos salvo para lo que éstos no contemplen, como es el caso de la sostenibilidad. No ha sido posible realizar posibles comparaciones, en cada momento, con el texto del futuro Código Estructural español, ya que el Coordinador del grupo de trabajo del Anejo de Sostenibilidad de dicho código ha solicitado a todos los miembros del grupo que no desvelasen el texto del anejo. De todas formas, de forma indirecta se han hecho llegar a dicho Coordinador muchas de las ideas y cálculos realizados en esta Tesis, por si fuesen de utilidad.

10.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO

En la Figura F10.1 se presenta el esquema general del modelo de evaluación desarrollado, incluyendo los pesos del árbol. La Tabla T10.1 incluye los parámetros de todas las funciones de valor de dicho modelo. El objeto continúa siendo la obtención de un Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES), al igual que en la EHE 08. La expresión del ICES según el Anejo 13 (ya indicada en el Capítulo 2) comprende una valoración de determinados aspectos que influyen en lo medioambiental, por medio del Índice de Sensibilidad Medioambiental (ISMA), y un análisis menos profundo de los aspectos económicos (factor de extensión de vida útil, b) y sociales (factor de contribución social, a) que, a su vez, no forman parte de un árbol MIVES, sino que se tienen en cuenta a través de la fórmula [E10.1].

$$ICES = a + b \cdot ISMA \quad [E10.1]$$

Por el contrario, el nuevo modelo aquí presentado aborda con un nivel de detalle similar los ámbitos ambientales, económicos y sociales, integrándolos todos en un árbol MIVES. Para ello se definen el Índice de Sensibilidad Económico (ISE) y el Índice de Sensibilidad Social (ISS), manteniendo la presencia del ISMA aunque, como se verá, modificando totalmente la estructura interna de este último. Los tres índices anteriores permiten obtener el ICES a través de la expresión E10.2, que procede del método MIVES.

$$ICES = \Omega_M \cdot ISMA + \Omega_S \cdot ISS + \Omega_E \cdot ISE = 0,5 \cdot ISMA + 0,3 \cdot ISS + 0,2 \cdot ISE \quad [E10.2]$$

En esta expresión Ω_M , Ω_E , Ω_S son los respectivos coeficientes de ponderación para cada una de las tres ramas de la sostenibilidad, medioambiental, social y económica, que aparecen recogidos en la Figura F10.1. En la determinación de estos coeficientes se ha considerado como primordial la preservación del entorno planetario sobre los otros dos factores, en la idea de que el deterioro ambiental podría llevarse por delante cualquier progreso social o económico, e incluso la propia vida humana. A su vez, se considera que los aspectos sociales, relativos a las personas y a su forma de vivir, son más importantes que los económicos (intereses materiales); si se da más peso a estos últimos frente a lo social, los posibles escenarios son poco recomendables. El menos malo sería aquel en el cual la mayoría de la personas sólo disponen de poder adquisitivo de supervivencia y, por tanto, al no adquirir la mayoría de los bienes ofrecidos, se generarían importantes problemas económicos. Cualquier otro escenario es peor (revueltas, aumento de la cantidad y agresividad de la delincuencia, entre otros). Podría decirse que sin planeta no hay personas, y sin personas no hay economía.

La Tabla T10.1 resume el conjunto de indicadores que forman parte del modelo, junto a los correspondientes coeficientes de ponderación y los parámetros y características de las funciones de valor respectivas.

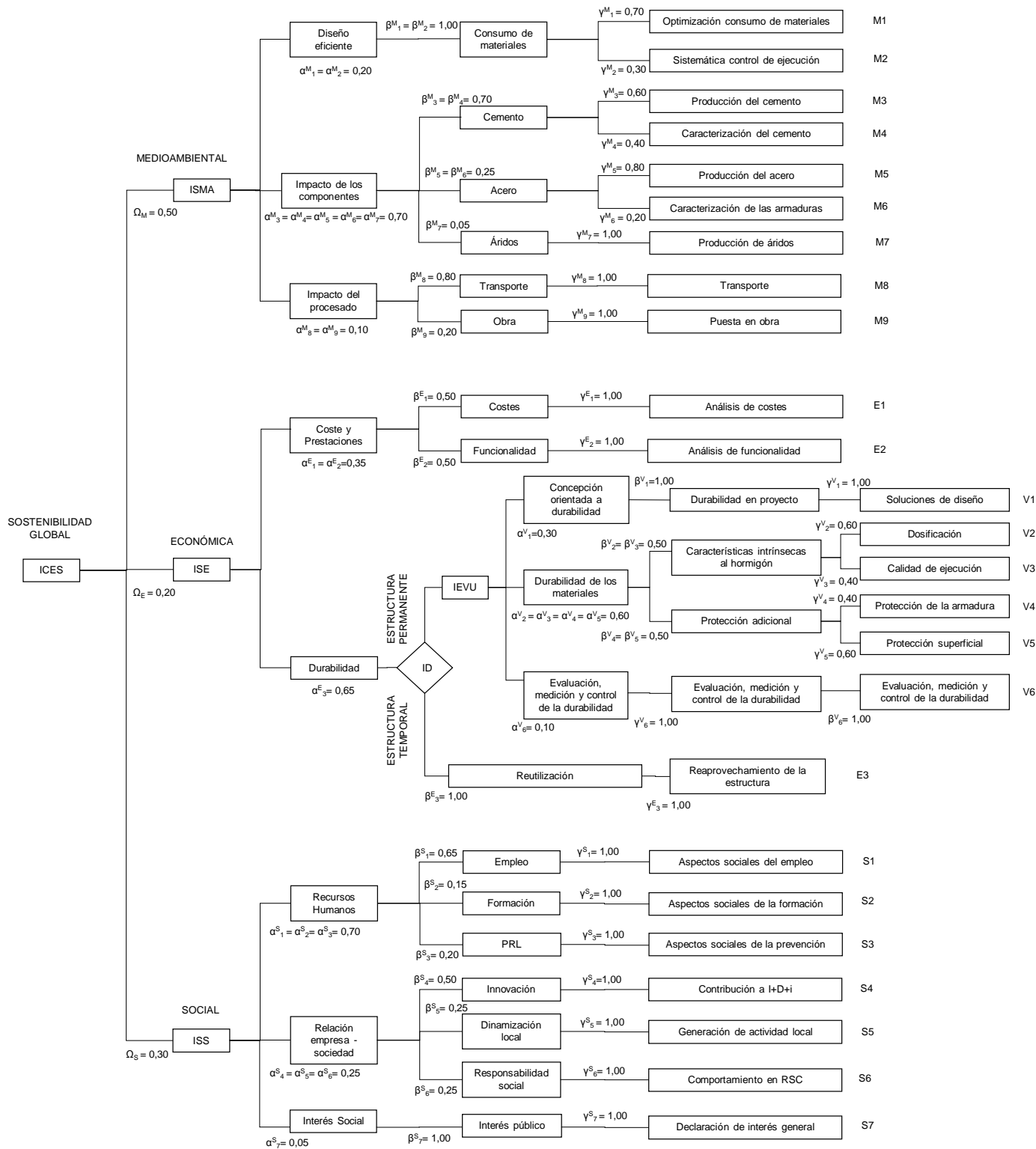


Figura F10.1: Árbol de requerimientos del ICES

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Indicador	Coeficientes de ponderación				Parámetros				Geometría de la función										
	Ω_i	α_i	β_i	γ_i	K_i	m_i	n_i	A_i	Pendiente	Curvatura (*)									
Optimización del consumo de materiales (M1)	0,50	0,20	1,00	0,70	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal									
Sistemática del control de ejecución (M2)				0,30	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal									
Producción de cemento (M3)		0,70	0,70	0,70	0,60	1,00	-0,10	0,30	4,00	Creciente	Forma "S"								
Caracterización del cemento (M4)					0,40	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal								
Producción del acero (M5)					0,80	1,00	-0,10	0,30	4,00	Creciente	Forma "S"								
Caracterización de las armaduras (M6)		0,70	0,25	0,25	0,20	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal								
Producción de áridos (M7)					0,05	1,00	1,00	-0,20	0,25	3,00	Creciente	Forma "S"							
Impacto de los procesos de transporte (M8)					0,10	0,80	1,00	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal						
Impacto de los procesos de ejecución (M9)		0,20	1,00	1,00				-0,20	0,33	4,00	Creciente	Forma "S"							
Análisis de costes (E1)	0,20	0,35	0,50	1,00	1,00	-0,30	0,50	7,00	Creciente	Forma "S"									
Análisis de funcionalidad (E2)											0,50	1,00	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal	
Reaprovechamiento de la estructura (E3)		0,65 (**)	1,00	1,00	1,00	-0,45	0,35	3,00	Creciente	Forma "S"									
Soluciones de diseño (V1)		0,65 (**)	0,30	1,00	1,00	2,19	-0,20	0,80	5,00	Creciente	Cóncava								
Dosificación del hormigón (V2)												0,50	0,60	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Ejecución del hormigón (V3)													0,40	1,22	-0,20	0,70	6,00	Creciente	Cóncava
Protección superficial (V4)	0,50											0,40	3,86	-0,30	1,00	2,00	Creciente	Cóncava	
Protección de las armaduras (V5)												0,60	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal	
Evaluación, medición y control de la durabilidad (V6)	0,10	1,00	1,00	1,00	-0,55	0,55	6,00	Creciente	Forma "S"										
Aspectos sociales del empleo (S1)	0,30	0,70	0,65	1,00	1,67	0,30	0,80	5,00	Creciente	Cóncava									
Aspectos sociales de la formación (S2)											0,15	1,00	10,50	0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal	
Aspectos sociales de la prevención (S3)											0,20	1,00	10,50	0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal	
Contribución a I+D+i (S4)		0,25	0,50	1,00	1,44	0,65	0,30	0,50	Creciente	Convexa									
Generación de actividad local (S5)											0,25	1,00	10,50	0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal	
Comportamiento en RSC (S6)											0,25	1,00	1,44	0,65	0,30	0,50	Creciente	Convexa	
Declaración de interés general (S7)											0,05	1,00	1,00	10,50	0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal

Tabla T10.1: Coeficientes de ponderación, parámetros y tipo de función para los indicadores incluidos en el modelo.

(*) La curvatura (cóncava, convexa) de las funciones de valor se entiende referida al eje de ordenadas.

(**) El indicador E3, por un lado, y el índice formado a partir de los indicadores V1 a V6, por otro, son alternativos y excluyentes entre sí, según el parámetro binario "carácter de la estructura". Los indicadores V1 a V6 forman parte del Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU), que implica un nivel más de árbol dentro del esquema general del modelo; de ahí la aparición de un coeficiente de ponderación adicional.

En este modelo el ISMA es un índice similar en concepto al de la EHE-08, aunque se han modificado sus características para representar más adecuadamente el perfil ambiental del hormigón, en base a los análisis descritos en los capítulos 4 a 7 y 9. Se trata de un sumatorio ponderado de 9 indicadores, cada uno de ellos formado por varias variables, y que recoge la gran mayoría de las tratadas en el Anejo 13. El nuevo ISMA se describe en detalle en el epígrafe 10.3.

El ISE, descrito en 10.4, presenta una diferencia importante con respecto al anterior, en cuanto a su constitución. Está formado por un sumatorio ponderado de dos indicadores, de similar tipo que los relativos al medio ambiente, y un factor, denominado Índice de Durabilidad (ID), que incluye en su expresión un parámetro de tipo binario (sólo admite los valores 0 ó 1). Este parámetro representa matemáticamente la necesidad de una elección en el curso de la evaluación. En el Capítulo 8 (epígrafes 8.3.3 y 8.3.4) se ha reflexionado acerca del efecto de la durabilidad de una estructura en su desempeño económico. Una de las conclusiones obtenidas es que la durabilidad de estructuras provisionales o temporales no es algo a valorar positivamente; por el contrario, debería valorarse la posibilidad de que la estructura sea reaprovechada o reutilizada para otros fines, una vez terminado el periodo de utilización para el que fue diseñada. Por contra, en estructuras en las que se prevé una utilización prolongada en el tiempo, la durabilidad sí resulta un parámetro muy relevante a la hora de evaluar su rendimiento económico. Adicionalmente, aún en este caso, en la realidad existe la posibilidad de que el beneficio que supondría la prolongación de la vida útil se viese mermado por haber alcanzado la estructura (o la construcción de la cual forma parte) su obsolescencia por otros motivos, como puedan ser los estéticos, los funcionales, o los de tipo político, entre otros.

Cuando la estructura es temporal o provisional, a través del parámetro binario el Índice de Durabilidad se valora mediante un indicador relativo a las posibilidades de reaprovechamiento de la estructura. Por el contrario, cuando la estructura es de tipo permanente se recorre el camino alternativo del árbol de requerimientos, que supone una evaluación mediante sumatorio ponderado de 6 indicadores, denominado Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU). En este último caso el IEVU puede afectarse por un coeficiente reductor, derivado de la probabilidad de obsolescencia prematura de la estructura, que minoraría el impacto positivo sobre el ICES de las posibles medidas de aumento de la durabilidad, contemplando así el hecho de que el sistema estructural puede dejar de prestar servicio no por agotamiento de sus materiales, sino por causas ajenas a los mismos.

Por lo que respecta al ISS, tratado en el epígrafe 10.5, éste consiste en un sumatorio ponderado de 7 indicadores, cuya particularidad es que los 6 primeros deben ser evaluados para cada una de las empresas que intervienen en el proceso de creación de la estructura, mientras que el indicador restante es único para la totalidad de la obra. Esta circunstancia se debe a que la evaluación de los aspectos sociales que se realiza por medio de este índice está muy vinculada al desempeño particular de cada empresa. En el Capítulo 8 se analizan los tipos de empresas que intervienen en este sector y se estima el porcentaje de generación de empleo atribuible a cada grupo (epígrafes 8.4.2 y 8.4.3, respectivamente). Los resultados obtenidos de esta evaluación múltiple de los 6 primeros indicadores sociales serán ponderados mediante coeficientes representativos de la contribución de cada empresa al empleo generado, de modo que el peso de los indicadores correspondientes a la ejecución en obra, a la preparación y montaje de ferralla y, en su caso, a la fabricación de elementos prefabricados, sea considerablemente superior a la de los que corresponden a la producción de cemento, acero y áridos y a la preparación de hormigón en planta.

10.3 ÍNDICE DE SENSIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL (ISMA)

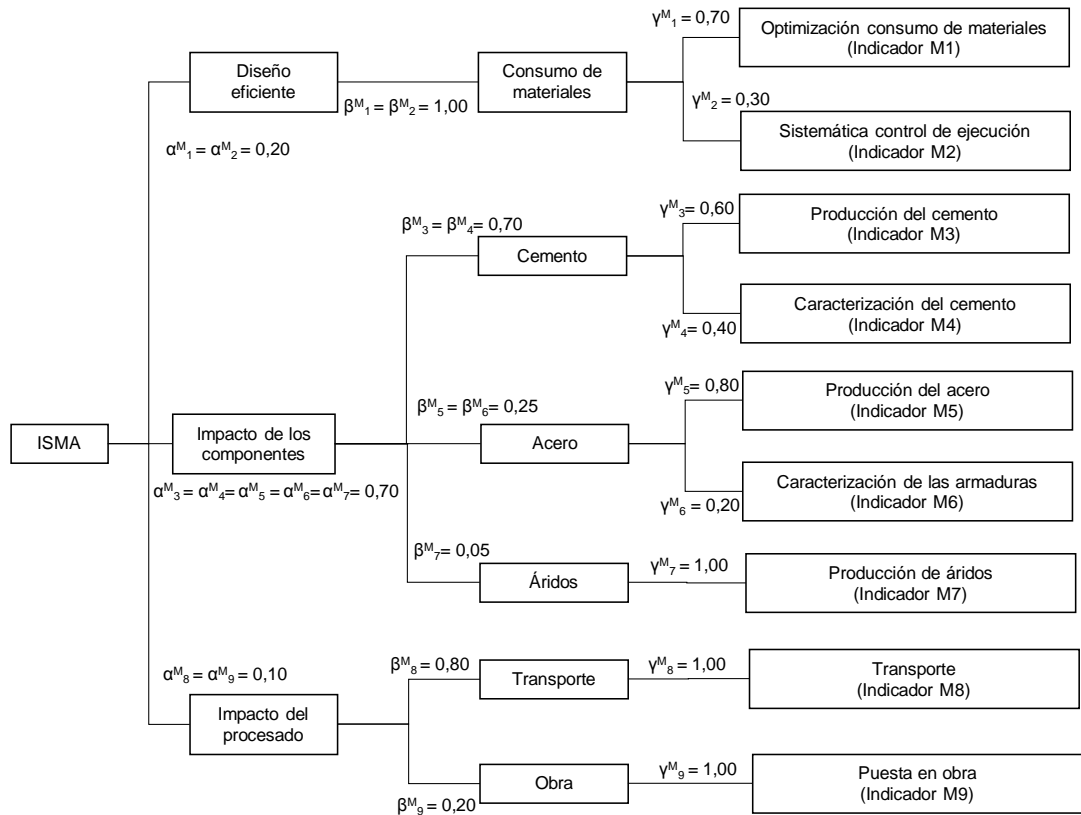


Figura F10.2: Esquema para el cálculo del ISMA

10.3.1 Introducción

El Índice de Sensibilidad Medioambiental (ISMA) tiene por objeto representar el buen desempeño ambiental de la estructura. Este índice está basado en MIVES (San José y Josa, 2008, Gómez et al, 2011), y por tanto puede adoptar valores comprendidos entre 0,00 y 1,00.

Con carácter general, el principio establecido a la hora de definir este índice es valorar todos aquellos aspectos que, no siendo ya obligatorios o preceptivos según la normativa estructural u otras disposiciones legales de aplicación, supongan una minoración del impacto de la estructura sobre el medio ambiente. A su vez, se pondera cada uno de ellos en función de su importancia relativa sobre el impacto ambiental total. Esta priorización de impactos fue establecida en los capítulos 4 a 7 y en el epígrafe 9.3 del Capítulo 9.

El ISMA (Figura F10.2) se estructura en tres niveles (requerimientos, criterios e indicadores), incluyendo un total de 9 indicadores. La estructura de este ISMA es completamente diferente a la de la EHE, si bien dentro de los diferentes indicadores se han mantenido la inmensa mayoría de los aspectos ambientales que se valoraban en el modelo original.

En el Requerimiento 1, sobre Diseño Eficiente, se valoran aspectos del proyecto y del diseño que pueden condicionar el impacto ambiental, centrándose en el ahorro de materiales mediante la elección de sistemas estructurales eficientes. El Requerimiento 2, sobre Impacto Ambiental de los Componentes, engloba los aspectos relacionados con la producción y caracterización de cemento, acero y áridos y es, con diferencia, el que mayor incidencia supone sobre variables clave como el consumo energético o la emisión de gases de efecto invernadero. A partir de ahora se empleará el término caracterización para hacer referencia a las características de un material o componente del hormigón estructural.

Por último, el Requerimiento 3, sobre Impacto Ambiental del Procesado, valora el desempeño ambiental de las etapas de transporte, preparación de hormigón en central, prefabricación de elementos y ejecución de estructura en obra.

El ISMA se define como el resultado de aplicar la expresión

$$ISMA = \sum \alpha_i^M \cdot \beta_i^M \cdot \gamma_i^M \cdot V_i^M \quad [E10.3]$$

Siendo:

V_i^M : valor, o índice de satisfacción, obtenido para el indicador medioambiental i .

α_i^M : coeficiente de ponderación de requerimiento correspondiente al indicador medioambiental i .

β_i^M : coeficiente de ponderación de criterio correspondiente al indicador medioambiental i .

γ_i^M : coeficiente de ponderación del indicador medioambiental i .

V_i^M procede de aplicar a cada indicador su función de valor correspondiente, definida por la expresión [E10.4] y los parámetros incluidos en la Tabla T10.2. Estos parámetros condicionan la forma de la función, que en cada caso ha sido elegida en base a las necesidades del modelo. En los epígrafes que describen cada indicador se incluye la representación gráfica de su función de valor.

$$V_i = K_i \cdot \left[1 - e^{-m_i \cdot \left(\frac{P_i}{n_i}\right)^{A_i}} \right] \quad [E10.4]$$

Indicador	Parámetro				Geometría de la función	
	K_i	m_i	n_i	A_i	Pendiente	Curvatura
Optimización del consumo de materiales (M1)	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Sistemática del control de ejecución (M2)	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Producción de cemento (M3)	1,00	-0,10	0,30	4,00	Creciente	Forma "S"
Caracterización del cemento (M4)	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Producción del acero (M5)	1,00	-0,10	0,30	4,00	Creciente	Forma "S"
Caracterización de las armaduras (M6)	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Producción de áridos (M7)	1,00	-0,20	0,25	3,00	Creciente	Forma "S"
Impacto de los procesos de transporte (M8)	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Impacto de los procesos de ejecución (M9)	1,00	-0,20	0,33	4,00	Creciente	Forma "S"

Tabla T10.2.- Parámetros y características de las funciones de valor del ISMA, V_i^M .

(*) La curvatura de las funciones de valor se entiende referida al eje de ordenadas.

Los coeficientes de ponderación α_i^M , β_i^M y γ_i^M , multiplicados entre sí, definen la importancia relativa que cada indicador ambiental, M_i , tiene en el modelo, y suponen un aspecto crucial a la hora de estimar el comportamiento de la estructura en cuanto a sostenibilidad ambiental se refiere. Estos coeficientes han sido elegidos en base a los análisis realizados previamente en esta Tesis sobre el impacto ambiental del hormigón (capítulos 4 a 7 y 9); en particular se toma como referencia la Tabla T9.2 del Capítulo 9, en la que se estiman el consumo energético y las emisiones contaminantes para un hormigón HA-25 B armado con 25 kg de acero por m^3 . Los resultados obtenidos en dicha tabla, representados gráficamente en las figuras F9.1 a F9.7 de aquel capítulo, sirven para establecer órdenes de magnitud, más que para asignar directamente valores numéricos a los coeficientes. Esto es así porque, como se muestra en el propio Capítulo 9, el papel de cada componente o proceso puede variar en función de las diferentes opciones y alternativas disponibles. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que en el modelo se valoran aspectos ambientales que no son directamente consumos energéticos ni emisiones contaminantes, y que igualmente deben encontrar acomodo en el mismo.

En este sentido, y en consonancia con las conclusiones del Capítulo 9, se puede establecer que los procesos de producción de componentes del hormigón son responsables de una parte muy abultada de su impacto ambiental, superando holgadamente el impacto del procesado del hormigón. Dentro de dichos procesos de producción, el proceso de fabricación más relevante, con mucha diferencia, es del cemento, seguido del proceso del acero, a cierta distancia. Los coeficientes de ponderación se muestran en la Tabla T10.3 y en la Figura F10.2, y se abordarán con mayor detalle en los epígrafes siguientes.

Coeficiente de ponderación	Valor	Coeficiente de ponderación	Valor
α^M_1, α^M_2	0,20	γ^M_1	0,70
$\alpha^M_3, \alpha^M_4, \alpha^M_5, \alpha^M_6, \alpha^M_7$	0,70	γ^M_2	0,30
α^M_8, α^M_9	0,10	γ^M_3	0,60
β^M_1, β^M_2	1,00	γ^M_4	0,40
β^M_3, β^M_4	0,70	γ^M_5	0,80
β^M_5, β^M_6	0,25	γ^M_6	0,20
β^M_7	0,05	γ^M_7	1,00
β^M_8	0,80	γ^M_8	1,00
β^M_9	0,20	γ^M_9	1,00

Tabla T10.3.- Coeficientes de ponderación para el cálculo del ISMA

Cada uno de los indicadores M_i del ISMA consta de diferentes aspectos a valorar. En función de las opciones seleccionadas para proyecto y obra se asigna una determinada puntuación a cada aspecto x , denominada λ^M_{ix} ; el sumatorio en x de todas las puntuaciones parciales λ^M_{ix} constituye la puntuación total P^M_i del indicador.

Dentro de una misma estructura es posible la coexistencia de elementos de distinto tipo: ejecutados in situ, prefabricados, con / sin armadura activa, empleando diferentes tipos de cemento, acero o árido, o empleando materiales procedentes de distintos proveedores, entre otros aspectos.

En estos casos es necesario calcular por separado las puntuaciones parciales para cada tipo de hormigón y obtener la puntuación total por medio del sumatorio de las anteriores, ponderadas según el porcentaje de hormigón de cada tipo empleado en la obra. Con todo ello, la función representativa de un indicador genérico tendría la forma del siguiente sumatorio en k :

$$P^M_i = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda^M_{ixk} \quad [E10.5]$$

Donde:

p_k : porcentaje de hormigón del tipo k presente en obra.

λ^M_{ixk} : suma de las puntuaciones parciales correspondientes a cada aspecto x que sean de aplicación a las partes de la estructura formadas por hormigón del tipo k , con respecto al indicador ambiental M_i .

La salida P^M_i de la función representativa de cada indicador [E10.5] se utiliza como valor de entrada, en el eje de abscisas, en la función de valor establecida para el indicador ambiental M_i .

En todos los casos la puntuación máxima alcanzable para cada indicador, $\sum \lambda^M_{ix}$, es de 100 puntos:

$$\sum \lambda^M_{ix} \leq 100 \quad [E10.6]$$

10.3.2 Requerimiento “Diseño Eficiente”

10.3.2.1 Introducción

En base a los análisis realizados en los capítulos previos, se puede asumir que los principales impactos medioambientales asociados al ciclo de vida de una estructura de hormigón son los relacionados con los componentes básicos del propio hormigón, especialmente el cemento y el acero. Los aspectos técnicos relacionados con la producción y el transporte de componentes suponen una parte muy importante del ISMA, de acuerdo con su relevancia a efectos ambientales, y se desarrollan ampliamente en los Requerimientos 2 y 3 del ISMA.

Este Requerimiento 1, de diseño eficiente, se centra en la importancia que tiene el proceso de diseño de la estructura para llegar a una solución optimizada en cuanto a la cantidad de hormigón y acero empleados; evidentemente, esto no implica descuidar los restantes condicionantes de diseño.

A este requerimiento, que comprende un único criterio y dos indicadores, se ha asignado un coeficiente de ponderación $\alpha^M = 0,20$ (Tabla T10.3; Figura F10.2), a gran distancia de la relevancia alcanzada por la producción de componentes, pero con mayor importancia que el procesado del hormigón. Este requerimiento tiene como objeto dar la importancia que merecen determinados aspectos que, aunque no se hayan incluido explícitamente en los estudios ambientales desarrollados en esta Tesis, sí es conocido y aceptado que suponen ventajas en cuanto al desempeño ambiental de la estructura, en tanto que permiten disminuir la cantidad de materiales empleada y, con ello, los impactos asociados. La prefabricación y el pretensado son buenos ejemplos de ello, por las razones que se resumen más adelante.

10.3.2.2. Indicador M1: optimización del consumo de materiales.

Este indicador se centra en tres aspectos, relacionados con la elección del tipo estructural. Puede entenderse como una forma de medir el grado en que la solución adoptada ha ido por el camino de la máxima eficiencia en el consumo de materiales. Los aspectos planteados han de ser de carácter muy general, ya que la EHE, y cualquier normativa que la sustituya, resulta de aplicación a una gran diversidad de estructuras, y establecer formulaciones demasiado concretas, específicas de un subsector, podría implicar grandes dificultades de aplicación en otros subsectores. En la ponderación se le asigna un coeficiente $\gamma^M_1 = 0,70$, quedando clara su preponderancia sobre el indicador M2 de sistemática de control de ejecución.

En primer lugar, en M1 se valora la inclusión en el proyecto de un estudio técnico comparativo entre varias opciones estructurales diferentes, que muestre la solución adoptada como la que requiere una menor cantidad de materiales. A continuación, desde este mismo punto de vista, se considera positivo que la estructura incorpore elementos prefabricados, por trabajarse en un entorno más protegido, con mejores procesos de producción y un mejor control de la misma; todo ello suele permitir menores coeficientes de seguridad y, con ello, menor consumo de materiales.

También se valora positivamente el empleo de armaduras activas, al aportar el pretensado una mayor eficiencia estructural, que supone importantes ahorros de materiales.

Por las propias características de este indicador, la expresión genérica indicada por [E10.5] queda reducida a un único miembro, ya que se está evaluando la estructura en su conjunto.

$$P^M_1 = (1/100) \cdot \sum \lambda^M_{1x} \quad [E10.7]$$

Los aspectos a valorar y sus puntuaciones asociadas se incluyen en la Tabla T10.4. En ella, las puntuaciones asociadas al empleo de elementos estructurales prefabricados y pretensados corresponden a sendas funciones lineales continuas, dependientes de su proporción sobre el total de la estructura.

Aspecto a valorar	λ^M_{1x}
El proyecto incluye un estudio técnico comparativo entre diferentes alternativas estructurales, que muestra que la elegida es la que implica un menor consumo de materiales.	$\lambda^M_{11} = 50$
Empleo de elementos estructurales prefabricados.	$\lambda^M_{12} = 25 \cdot M_{\text{pref}} / M_{\text{tot}}$
Empleo de elementos estructurales dotados de armadura activa.	$\lambda^M_{13} = 25 \cdot M_{\text{act}} / M_{\text{tot}}$

Tabla T10.4.- Aspectos a valorar en el indicador M1 (optimización del consumo de materiales) y puntuaciones λ^M_{1x} asociadas.

Siendo:

M_{tot} : peso total de la estructura considerada

M_{pref} : peso del conjunto de elementos prefabricados que forman parte de la estructura.

M_{act} : peso del conjunto de elementos estructurales dotados de armadura activa.

A lo largo de este capítulo se hacen evaluaciones en función del peso, por ejemplo, de cemento, áridos o adiciones. En estos materiales no tiene sentido evaluar en base al volumen. Con objeto de que estas evaluaciones siempre se hagan de la misma forma, aquí se emplea también el peso, en vez del volumen, siendo esta última variable la habitual para realizar determinadas mediciones. El doctorando es consciente de que hay casos poco frecuentes en los cuales las evaluaciones de algunas estructuras con áridos de barita (muy pesadas), o de vermiculita (muy ligeras), pueden verse influidas por la densidad de dichos materiales. Sin embargo, se ha preferido mantener la homogeneidad aludida, en la hipótesis de que esto no debe alterar la evaluación de forma relevante.

Los parámetros característicos de la función de valor V^M_1 (Tabla T10.2) dan lugar a una función lineal y creciente, recogida en la Figura 10.3. Se ha adoptado esta forma debido a que no se observa un motivo claro para incentivar de forma especial algún grado de cumplimiento. La prefabricación y el pretensado pueden ser aplicables o no, dependiendo del tipo de estructura, y su trasposición a las puntuaciones ya queda regulada por las funciones lineales que las representan. La existencia de una justificación técnica de la solución adoptada es una variable que sólo puede adoptar dos posibles valores (0/50), y recibe una valoración superior a las de las otras dos variables debido a que es aplicable en todo caso, mientras que no ocurre lo mismo con la prefabricación y el pretensado.

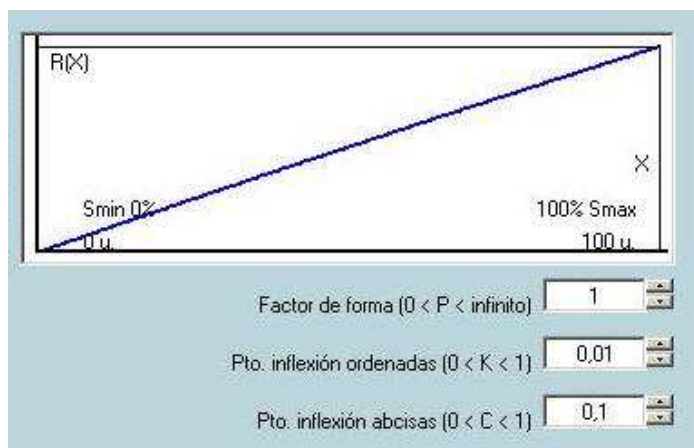


Figura F10.3.- Función de valor para el indicador M1 (optimización del consumo de materiales).

10.3.2.3. Indicador M2: sistemática del control de ejecución.

Este indicador valora, como aspecto principal, la reducción de los coeficientes de seguridad parciales de hormigón y acero, γ_c y γ_s , en base al cumplimiento de las condiciones que recoge en los puntos 15.3.1 y 15.3.2. de la EHE-08, que tienen que ver con la adopción de un nivel intenso de control de ejecución y la posesión de distintivos de calidad. La disminución de dichos coeficientes conduce a un diseño menos sobredimensionado, y por ello, a una mayor economía de materiales.

Como aspecto secundario, se valora positivamente el empleo de probetas cúbicas en lugar de cilíndricas (que permite evitar el empleo de compuestos de azufre para el refrentado de las mismas). Ambos aspectos estaban ya contemplados en la EHE-08, y se han considerado menos importantes frente a los abordados en el indicador M1; de ahí que su coeficiente de ponderación sea $\gamma^M_2 = 0,30$, frente a $\gamma^M_1 = 0,70$.

Al igual que en el indicador anterior, se aplica al conjunto de la estructura, y por ello su expresión se reduce a:

$$P^M_2 = (1/100) \cdot \sum \lambda^M_{2x} \quad [E10.8]$$

La disminución del coeficiente de seguridad es, dada su influencia en la reducción de la cantidad total de hormigón y armadura requeridos, el aspecto que acapara la mayor parte de la puntuación. La puntuación asignada al empleo de probetas cúbicas es proporcional a su utilización frente al número total de probetas; y en todo caso es de una relevancia reducida.

Aspecto a valorar	λ_{2x}^M
En el dimensionamiento de la estructura se ha aplicado la disminución de γ_s , por cumplimiento de lo recogido en el punto 15.3.1 de la EHE-08.	$\lambda_{21}^M = 35$
En el dimensionamiento de la estructura se ha aplicado la disminución de γ_c , por cumplimiento de lo recogido en los puntos 15.3.2 de la EHE-08.	$\lambda_{21}^M = 50$
Empleo de probetas cúbicas para la realización de controles de calidad.	$\lambda_{23}^M = 15 \cdot N_{cub} / N_{tot}$

Tabla T10.5.- Aspectos a valorar en el indicador M2 (sistemática del control de ejecución) y puntuaciones λ_{2x}^M asociadas.

Los aspectos a valorar en el indicador M2 se incluyen en la Tabla T10.5, siendo:

N_{cub} : número de probetas cúbicas realizadas.

N_{tot} : número total de probetas realizadas.

Como se puede observar en dicha tabla, la puntuación es mayor para la reducción del coeficiente de seguridad parcial del hormigón porque, aplicándose en ambos casos una reducción similar, es el hormigón el que mayor impacto ambiental tiene, en general.

Sin aplicación de los coeficientes disminuidos de seguridad, que son las variables principales, la eficacia medioambiental obtenida sería escasa. Por tanto, al igual que en el caso anterior, la distribución de puntuaciones del indicador es lo suficientemente representativa, y se adopta una función de valor lineal y creciente, de acuerdo con la Figura F10.4, cuyos parámetros se recogen en Tabla T10.2.

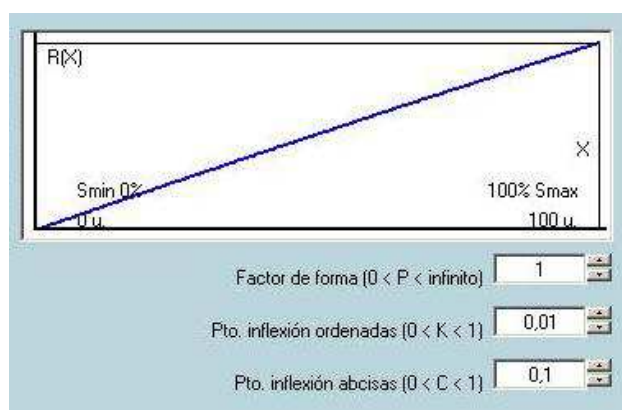


Figura F10.4.- Función de valor para el indicador M2 (sistemática del control de ejecución).

10.3.3. Requerimiento “Impacto Ambiental de los Componentes”.

10.3.3.1. Introducción.

De la Tabla T9.2 del Capítulo 9 de esta Tesis se deduce la capital importancia ambiental de la producción de los componentes del hormigón: para el hormigón tomado como referencia, el 85% de la energía consumida y el 92% de las emisiones de CO_2 corresponden a estos procesos. En emisiones de otros contaminantes como SO_x y PM_{10} , el porcentaje está por encima del 95%.

Como se ha demostrado en el Capítulo 4, la fabricación de cemento es un proceso caracterizado por una elevada intensidad energética y un gran impacto contaminante, y por ello acapara una parte muy grande de los impactos anteriores, superando el 60% del consumo energético total y el 80% de las emisiones totales de dióxido de carbono; esto es así salvo en cuanto a la emisión de compuestos orgánicos volátiles, donde el proceso clave es la utilización de maquinaria de obra con motores de gasolina, y a la generación de partículas, donde el impacto atribuido al cemento es aproximadamente igual al de la producción de áridos en canteras.

El acero se sitúa como segundo impacto en las condiciones establecidas de cuantía de armado, y empleando material proveniente de reciclaje. No obstante, la relevancia del acero puede incrementarse de forma muy notable si se modifican las mencionadas condiciones. La incidencia del acero sobre el consumo energético y las emisiones contaminantes totales del hormigón es menor que la del cemento debido a que, en términos absolutos, la cantidad de cemento contenida en 1 m^3 de hormigón suele ser muy superior a la cantidad de acero presente en esa misma unidad. Por otra parte, lo habitual (véase el Capítulo 5) es emplear armaduras fabricadas en horno eléctrico, a partir del reciclaje de chatarra. Si el acero empleado en las armaduras fuese de origen primario, su papel ambiental podría ser mucho más importante (véase el Capítulo 9, epígrafe 9.3.3).

Los áridos, por su parte, juegan un papel muy discreto en la mayoría de los aspectos estudiados (siempre por debajo del 5% del total), salvo en la generación de partículas, donde se sitúan a la par del cemento, como se ha indicado.

Este requerimiento pretende reflejar las circunstancias anteriores, por medio de la asignación de un coeficiente de ponderación $\alpha^M = 0,70$ (Tabla T10.3; Figura F10.2) que refleja su influencia sobre el balance ambiental. Se divide en tres criterios, relativos a cemento, acero y áridos, a los que se asignan los coeficientes $\beta^M_i = 0,70, 0,25$ y $0,05$, respectivamente, de acuerdo con el reparto de impactos establecido anteriormente. El consumo de agua se evalúa de forma transversal en todos ellos, mientras que el empleo de aditivos no se incluye en el modelo, dada su escasa incidencia sobre el impacto total. Esto es lógico, si se piensa en las reducidísimas cantidades de aditivos que se emplean en cualquier dosificación.

El criterio dedicado al cemento contiene los indicadores M3 y M4, el primero de ellos concerniente a su fabricación, y el segundo al tipo de cemento empleado, en cuanto a su contenido en adiciones. Entre ellos se adopta un reparto de pesos 60/40 ($\gamma^M_3 = 0,60; \gamma^M_4 = 0,40$), asignando una mayor importancia a la reducción del impacto durante los procesos de fabricación, pero sin desdeñar el papel que juegan las adiciones en la reducción de consumo de clinker, según se ha visto en el epígrafe 9.3.2 del Capítulo 9.

El criterio que se ocupa del acero, componente cuya producción origina un considerable impacto sobre el medio, se divide también en dos indicadores, uno relativo a la producción (M5) y otro a la caracterización de las armaduras (M6). En este caso la relevancia de la fabricación resulta bastante mayor que en el caso anterior, siendo $\gamma^M_5 = 0,80$ $\gamma^M_6 = 0,20$. Esto es debido al fuerte impacto ambiental del acero, sobre todo teniendo en cuenta que cabe la posibilidad de empleo de hacer primario.

Por último, la producción de áridos se valora por medio del indicador M6. Frente a los dos anteriores, a los áridos les corresponde un consumo energético y unas emisiones contaminantes mucho

menores, tal como se ha visto en el Capítulo 6; sin embargo su papel no es despreciable, debido al gran volumen de ellos empleado, y a que suponen un impacto ambiental apreciable sobre el paisaje y sobre el entorno de las canteras. En materia de generación de partículas en suspensión los áridos suponen impactos similares a los la producción de cemento, como ya se ha indicado.

10.3.3.2. Indicador M3: producción del cemento.

Este indicador valora algunos de los aspectos ambientales más relevantes, en términos de su contribución absoluta al consumo de energía primaria y a la emisión de contaminantes. La producción industrial de cemento se basa en un proceso de calcinación de material primas minerales en un horno rotatorio, necesiándose grandes consumos de combustibles fósiles y emitiéndose grandes cantidades de dióxido de carbono, tanto por causa del proceso de combustión como por las reacciones químicas que se producen en la materia calcinada. El Capítulo 4 ha desarrollado en profundidad el estudio ambiental de la producción de cemento.

La posesión de certificaciones medioambientales por parte de las instalaciones es un aspecto muy valorado en el Anejo 13, como se indica en el análisis crítico realizado en el Capítulo 9 (epígrafe 9.4.2). Se mantiene el concepto en este indicador, así como en otros posteriores, aunque otorgándole puntuaciones más reducidas.

Los aspectos a los que se presta mayor atención son el empleo de combustibles alternativos y de materias primas residuales, junto con la reducción de distancias de transporte entre la planta y la cantera; a su vez, se emplean funciones lineales para asignar las puntuaciones de un modo proporcional. En base a los datos de producción analizados en el Capítulo 4, se adoptan como límites superiores de la sustitución de combustibles y de materias primas el 10% el 15% respectivamente. Por encima de esos porcentajes de obtiene la puntuación máxima, con objeto de ajustarse a los parámetros manejados actualmente en la industria; no tendría sentido valorar situaciones hoy por hoy no factibles como, por ejemplo, un empleo de combustible 100% procedente de biomasa o residuos. Con respecto a la distancia de transporte se otorga la puntuación máxima si dicha distancia es inferior a 5 km, y una puntuación nula si supera los 30 km.

Con pesos menores a los de las anteriores variables, se valora también la adopción de medidas correctoras frente a la generación de polvo, el empleo de sistemas de ahorro de agua y el reciclaje de los residuos generados, aspectos que en el Anejo 13 se constituían como indicadores independientes, y ahora se integran en los diferentes procesos involucrados.

Particularizando la ecuación [E10.5] a este indicador, se obtiene:

$$P_3^M = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{3xk}^M \quad [E10.9]$$

Se entiende que es posible la coexistencia en obra de elementos estructurales elaborados con cementos de diferente tipo o diferente origen, de modo que para aplicar la expresión anterior debe evaluarse cada tipo de cemento según la Tabla T10.6. La puntuación total del indicador corresponde a la suma de las puntuaciones parciales de cada cemento, ponderada por medio de los porcentajes de empleo de cada tipo de cemento sobre el total de la estructura.

Aspecto a valorar		λ_{3x}^M
Certificación ambiental de la fábrica de la que procede el cemento empleado	Procedente de un país firmante de un protocolo internacional de control de emisiones, sin certificación adicional.	$\lambda_{31}^M = 2$
	Procedente de una fábrica certificada según ISO 14001 o equivalente.	$\lambda_{31}^M = 5$
	Procedente de una fábrica certificada según EMAS o equivalente.	$\lambda_{31}^M = 10$
Sustitución parcial de combustibles fósiles por combustibles renovables (biomasa) en la producción del cemento		$\lambda_{32}^M = 166,67 \cdot E_{ren} / E_{tot} \quad (E_{ren}/E_{tot} \leq 0,15)$ $\lambda_{32}^M = 25 \quad (E_{ren}/E_{tot} > 0,15)$
Sustitución parcial de combustibles fósiles por residuos urbanos o industriales (no renovables) en la producción del cemento		$\lambda_{33}^M = 166,67 \cdot E_{res} / E_{tot} \quad (E_{res}/E_{tot} \leq 0,15)$ $\lambda_{33}^M = 25 \quad (E_{res}/E_{tot} > 0,15)$
Sustitución parcial de materias primas por residuos industriales, o de construcción o demolición, en la producción del cemento		$\lambda_{34}^M = 200 \cdot M_{res} / M_{tot} \quad (M_{res}/M_{tot} \leq 0,10)$ $\lambda_{34}^M = 20 \quad (M_{res}/M_{tot} > 0,10)$
Distancia de transporte entre la cantera y la fábrica		$\lambda_{35}^M = 20 \quad (d < 5 \text{ km})$ $\lambda_{35}^M = 24 - 0,80 \cdot d \quad (5 \text{ km} \leq d \leq 30 \text{ km})$ $\lambda_{35}^M = 0 \quad (d > 30 \text{ km})$
Existencia de un sistema de reducción de polvo en cantera	Empleando sistemas convencionales como riego, pavimentación de accesos, limpieza de neumáticos, etc.	$\lambda_{36}^M = 3$
	Empleando alguno de los anteriores y además sistemas adicionales como empleo de lonas, estabilizantes químicos, etc.	$\lambda_{36}^M = 5$
Existencia en la planta de un sistema de reducción del consumo de agua, o de un reciclaje del agua de proceso		$\lambda_{37}^M = 5$
Reciclaje o valorización de los residuos generados por la planta de producción		$\lambda_{38}^M = 5 \cdot R_{r-v} / R_{tot}$

Tabla T10.6.- Aspectos a valorar en el indicador M3 (producción del cemento) y puntuaciones λ_{3x}^M asociadas.

Siendo:

E_{ren} : energía térmica del proceso obtenida a partir de combustibles renovables.

E_{res} : energía térmica del proceso obtenida a partir de residuos.

E_{tot} : energía térmica total empleada en el proceso.

M_{res} : peso de las materias primas procedentes de residuos.

M_{tot} : peso total de las materias primas empleadas en el proceso.

R_{r-v} : peso de los residuos de la planta enviados a valorización / reciclaje.

R_{tot} : peso de los residuos totales generados por la planta.

Dada la importancia de este indicador y las múltiples variables que lo forman, se ha optado por asignarle una función de valor V_3^M , cuyos parámetros se recogen en Tabla T10.2, creciente y con geometría en forma de S (Figura F10.5), en la que el valor obtenido no sea proporcional a la

puntuación alcanzada, sino que sea necesario alcanzar puntuaciones medias o altas para obtener resultados significativos. Esto se hace con la idea de incentivar la adopción de medidas de calado, como son las relacionadas con la sustitución de combustible o materias primas.

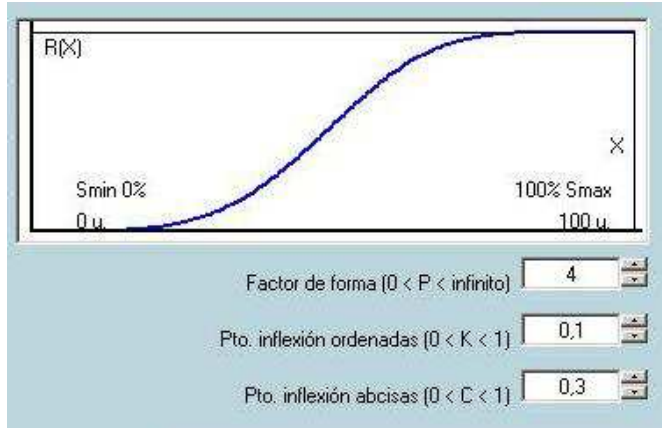


Figura F10.5.- Función de valor para el indicador M3 (producción del cemento).

10.3.3.3. Indicador M4: caracterización del cemento.

En este indicador se valora el empleo de adiciones minerales, bien en el cemento, bien en el hormigón. Las adiciones sustituyen al clinker, evitando los elevados impactos ambientales asociados a su producción. Además, suelen ser residuos o subproductos de otros procesos industriales; tenerlos en cuenta en el modelo se hace para incentivar más su reutilización. El Capítulo 2 incluye un resumen de la información obtenida de la bibliografía al respecto, mientras que en el Capítulo 9 (epígrafe 9.3.2) se valora la ventaja que suponen en cuanto a disminución del consumo energético y de emisiones contaminantes.

La sustitución de clinker por adiciones se valora de forma lineal, con un tope máximo del 35% del material cementante. Cementos con porcentajes de sustitución más elevados obtendrían la puntuación máxima.

Particularizando la ecuación [E10.5] a este caso, se obtiene:

$$P_4^M = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{4xk}^M \quad [E10.10]$$

Siendo de aplicación los mismos comentarios que en el indicador anterior.

Aspecto a valorar	λ_{4x}^M
Empleo de adiciones (cenizas volantes, escoria de alto horno, humo de sílice, puzolanas, etc.) como sustitutivos de clinker, bien en la producción de cemento, bien como componentes del hormigón (conjuntamente con empleo de CEM I), según la indicado en EHE-08 y RC-16.	$\lambda_{41}^M = 286 \cdot M_{ad} / M_{cem} \quad (M_{ad}/M_{cem} \leq 0,35)$ $\lambda_{41}^M = 100 \quad (M_{ad}/M_{cem} > 0,35)$

Tabla T10.7.- Aspectos a valorar en el indicador M4 (caracterización del cemento) y puntuaciones λ_{4x}^M asociadas.

Los aspectos a valorar en el indicador M4 se incluyen en la Tabla T10.7, siendo:

M_{ad} : contenido en adiciones del cemento u hormigón.

M_{cem} : contenido total de material cementante.

Para este indicador se ha establecido una función de valor V^M_4 lineal y creciente (Tabla T10.2 y Figura F10.6), al existir una única variable, cuya puntuación procede también de una función lineal.

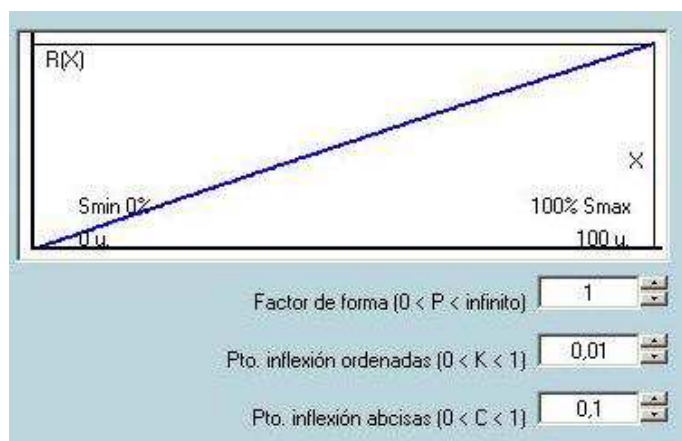


Figura F10.6.- Función de valor para el indicador M4 (caracterización del cemento).

10.3.3.4. Indicador M5: producción del acero.

Desde el punto de vista ambiental, el aspecto clave en la producción de acero es la utilización (o no) de chatarra como materia prima. El acero reciclado, que según lo indicado en el Capítulo 5 es el único empleado en España para elaborar armaduras corrugadas, procede de acerías de horno eléctrico en las que se funde chatarra junto a pequeñas cantidades de arrabio y otros aleantes. Sin embargo, existe la posibilidad de que armaduras procedentes de otros países estén fabricadas mediante acero primario, cuyo impacto ambiental resultaría mucho más elevado. En el Capítulo 9 (epígrafe 9.3.3) se estima la repercusión que tendría sobre la tabla T9.2 el empleo de acero primario en lugar de reciclado, obteniéndose unos incrementos de consumo energético y emisiones contaminantes muy importantes; en el caso de la energía, ésta llegaría a superar a la consumida por la fabricación de cemento. Esta variable se valora mediante una función lineal que depende del contenido en material reciclado, otorgando la puntuación máxima a partir de un empleo de chatarra superior al 90%; téngase en cuenta que siempre se necesita cierto aporte de material nuevo para corregir la composición. Por debajo de un 80% no se puntúa, siguiendo el patrón marcado por el Anejo 13.

La segunda variable en importancia es el reciclaje de escorias siderúrgicas, principalmente por la ventaja que supone en cuanto a gestión de residuos. Las escorias de la producción de acero primario pueden emplearse como adiciones al clinker (CEDEX, 2009), mientras que las escorias de hornos de arco eléctrico se utilizan como áridos en construcción (CEDEX, 2007).

Se asigna una pequeña puntuación a la realización de controles radiológicos en las plantas de fundición, para detectar la posible presencia de chatarra contaminada con radiactividad antes de que genere problemas de mayor alcance. Por lo que se ha podido consultar, esta práctica está generalizada actualmente en la industria siderúrgica española. Por ello no tiene sentido establecer una puntuación alta. Su inclusión obedece principalmente a poder valorar los aceros importados.

Otros aspectos a valorar son análogos a los introducidos en el indicador M3: posesión de certificaciones ambientales, reducción de consumo de agua y reciclaje de residuos generados.

Particularizando la ecuación [E10.5] a este caso, teniendo en cuenta que existe la posibilidad de que coexistan en la obra aceros procedentes de diferentes suministradores, se obtiene:

$$P^M_5 = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda^M_{5xk} \quad [E10.11]$$

Aspecto a valorar		λ^M_{5x}
Certificación ambiental de la fábrica de la que procede el acero empleado	Procedente de un país firmante de un protocolo internacional de control de emisiones, sin certificación adicional.	$\lambda^M_{51} = 2$
	Procedente de una fábrica certificada según ISO 14001 o equivalente.	$\lambda^M_{51} = 5$
	Procedente de una fábrica certificada según EMAS o equivalente.	$\lambda^M_{51} = 10$
Empleo de acero reciclado		$\lambda^M_{52} = 0 \quad (A_{rec}/A_{tot} < 0,80)$ $\lambda^M_{52} = (150 \cdot A_{rec} / A_{tot}) - 85 \quad (0,80 \leq A_{rec}/A_{tot} \leq 0,90)$ $\lambda^M_{52} = 50 \quad (A_{rec}/A_{tot} > 0,90)$
Reciclaje de las escorias siderúrgicas generadas durante la producción del acero		$\lambda^M_{53} = 30 \cdot Me_{rec} / Me_{tot}$
Realización de controles radiológicos sobre las materias primas para la fabricación del acero		$\lambda^M_{54} = 5$
Existencia de un sistema de reducción del consumo de agua en la planta o de reciclaje del agua de proceso		$\lambda^M_{55} = 5$
Reciclaje o valorización de los residuos generados por la planta de producción		$\lambda^M_{56} = 5 \cdot R_{r-v} / R_{tot}$

Tabla T10.8: Aspectos a valorar en el indicador M5 (producción del acero) y puntuaciones λ^M_{5x} asociadas.

Los aspectos a valorar en el indicador M5 se incluyen en la Tabla T10.8, donde:

A_{rec} : peso del acero procedente de chatarra.

A_{tot} : peso total de acero.

Me_{rec} : peso de escorias siderúrgicas recicladas.

Me_{tot} : peso total de escorias siderúrgicas generadas.

R_{r-v} : peso de los residuos de la planta enviados a valorización / reciclaje.

R_{tot} : peso de los residuos totales generados por la planta.

De un modo análogo a como se indicó en el indicador M3, se emplea una función de valor V^M_5 , creciente y con forma de S (Tabla T10.2), cuya geometría se recoge en la Figura F10.7). Esta función está pensada para incentivar el empleo de acero reciclado.

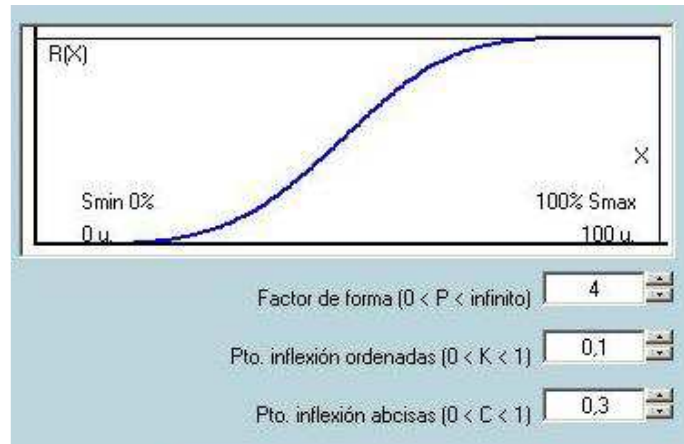


Figura F10.7.- Función de valor para el indicador M5 (producción del acero).

10.3.3.5. Indicador M6: caracterización de las armaduras.

El segundo indicador dedicado al acero valora aspectos relacionados con las armaduras, que ya se recogían en el Anejo 13 y cuyo impacto ambiental se estima de menor orden que el de los aspectos tratados en el indicador anterior.

Particularizando la ecuación [E10.5], teniendo en cuenta que existe la posibilidad de que coexistan en la obra diferentes tipos de armaduras, o bien armaduras procedentes de diferentes suministradores, se obtiene:

$$P^M_{\delta} = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda^M_{\delta k} \quad [E10.12]$$

Aspecto a valorar		$\lambda^M_{\delta k}$
Certificación ambiental de la empresa que prepara la ferralla	Planta certificada según ISO 14001 o equivalente.	$\lambda^M_{61} = 15$
	Planta certificada según EMAS o equivalente.	$\lambda^M_{61} = 25$
La armadura dispone de un distintivo de calidad opcional (armadura certificada)		$\lambda^M_{62} = 25$
Empleo de uniones atadas entre armaduras, en vez de soldadas		$\lambda^M_{63} = 25 \cdot Nu_{at} / Nu_{tot}$
Empleo de armaduras elaboradas según norma UNE 36.831		$\lambda^M_{64} = 25 \cdot Ma_{UNE} / Ma_{tot}$

Tabla T10.9: Aspectos a valorar en el indicador M6 (caracterización de las armaduras) y puntuaciones $\lambda^M_{\delta k}$ asociadas.

Los aspectos a valorar en el indicador M6 se incluyen en la Tabla T10.9, donde:

Nu_{at} : número de uniones atadas.

Nu_{tot} : número total de uniones (soldadas + atadas).

Ma_{UNE} : peso de las armaduras elaboradas según UNE 36.831.

Ma_{tot} : peso total de las armaduras.

No encontrando razones que lleven a una geometría diferente, se adoptado la función de valor V_6^M , de tipo lineal y creciente (Tabla T10.2), recogida en la Figura T10.8.

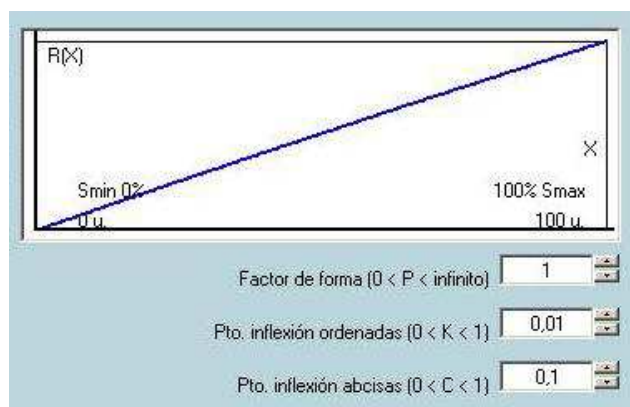


Figura F10.8.- Función de valor para el indicador M6 (caracterización de las armaduras).

10.3.3.6. Indicador M7: producción de áridos.

El árido es el tercer componente principal del hormigón. Tal como se ha visto con detalle en el Capítulo 6, su incidencia ambiental en cuanto a consumo de energía y emisión de contaminantes es considerablemente inferior a la correspondiente al cemento y al acero. No obstante, no puede obviarse su papel en cuanto a generación de partículas en suspensión, derivada del trabajo de maquinaria en entornos no pavimentados, del empleo de explosivos y de los propios procesos de machaqueo de materiales pétreos. Resulta también destacable la afección de las canteras sobre el paisaje y, en general el medio natural, aunque no se ha encontrado un modo sencillo de incluir este aspecto en el modelo.

Se incluye dentro de este indicador el reciclaje de áridos para el hormigón, aspecto ya tratado por el Anejo 13. La EHE permite su utilización sin requisitos adicionales hasta en un porcentaje del 20%, por encima del cual se necesitará la realización de estudios de laboratorio. En la Tabla T10.10 se ve cómo esta variable se puntúa por medio de una función lineal con dos tramos, cuya frontera es precisamente el 20% de sustitución de árido. La pendiente de la recta es mayor en el primer tramo que en el segundo, tratando de incentivar la introducción de este tipo de árido, aunque sea en pequeñas cantidades.

De nuevo, también se contemplan aquí los aspectos de certificación ambiental de las instalaciones, reducción del consumo de agua y reciclaje de residuos, incluidos en indicadores anteriores.

Particularizando la ecuación [E10.5] para este caso, se obtiene:

$$P_7^M = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{7xk}^M \quad [E10.13]$$

Aspecto a valorar		λ_{7x}^M
Certificación ambiental de la cantera	Cantera certificada según ISO 14001 o equivalente.	$\lambda_{71}^M = 10$
	Cantera certificada según EMAS o equivalente.	$\lambda_{71}^M = 15$
Empleo de árido reciclado para la preparación del hormigón, con las limitaciones indicadas en EHE-08		$\lambda_{72}^M = 30 \cdot \text{Mar}_{\text{rec}} / \text{Mar}_{\text{tot}} \quad (\text{Mar}_{\text{rec}} / \text{Mar}_{\text{tot}} < 0,20)$ $\lambda_{72}^M = (12,50 \cdot \text{Mar}_{\text{rec}} / \text{Mar}_{\text{tot}}) + 27,50 \quad (\text{Mar}_{\text{rec}} / \text{Mar}_{\text{tot}} \geq 0,20)$
Existencia de un sistema de reducción de polvo en cantera	Empleando sistemas convencionales como riego, pavimentación de accesos, limpieza de neumáticos, etc.	$\lambda_{73}^M = 10$
	Empleando alguno de los anteriores y además sistemas adicionales como empleo de lonas, estabilizantes químicos, etc.	$\lambda_{73}^M = 15$
Existencia de un sistema de reducción del consumo de agua en la cantera		$\lambda_{74}^M = 15$
Reciclaje o valorización de los residuos generados por la cantera		$\lambda_{75}^M = 15 \cdot R_{r-v} / R_{\text{tot}}$

Tabla T10.10.- Aspectos a valorar en el indicador M7 (producción de áridos) y puntuaciones λ_{7x}^M asociadas.

Los aspectos a valorar en el indicador M7 se incluyen en la Tabla T10.10, donde:

Mar_{rec} : peso del árido procedente de reciclaje.

Mar_{tot} : peso total del árido.

R_{r-v} : peso de los residuos de la planta enviados a valorización / reciclaje.

R_{tot} : peso de los residuos totales generados por la planta.

En este caso se opta por utilizar una función de valor V_{7}^M , creciente y con forma de "S", restrictiva en bajos niveles de cumplimiento, pero generosa en los niveles altos, de modo que se necesite la adopción de varias medidas para obtener una puntuación mínimamente aceptable, pero no sea necesario puntuar en todos los campos para que el resultado sea bueno. Se adopta esta decisión principalmente en base a que el empleo de árido reciclado, que resulta la variable más importante, puede no ser de aplicación en algunos casos, o no resultar ambientalmente ventajosa, en caso de tener que recurrir a transportes a gran distancia.

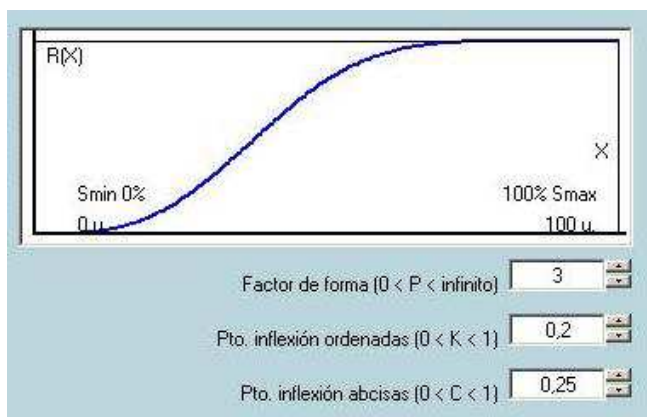


Figura F10.9.- Función de valor para el indicador M7 (producción de áridos).

10.3.4. Requerimiento “Impacto Ambiental del Procesado del Hormigón”.

10.3.4.1. Introducción.

El tercer requerimiento de este índice se refiere al impacto de la preparación y transporte del hormigón y al de su aplicación en obra para la construcción de elementos estructurales. Consta de dos indicadores, M8 y M9, dedicados respectivamente a la evaluación del impacto del transporte, y del procesado y puesta en obra del hormigón.

Como requerimiento, recibe el coeficiente de ponderación α^M más bajo de los tres, de valor 0,10. Internamente a este requerimiento, el mayor peso corresponde al transporte ($\beta^M_8 = 0,80$) frente al procesado y ejecución ($\beta^M_9 = 0,20$), en la línea de los resultados recopilados en la Tabla T9.2 del Capítulo 9, ya comentados en epígrafes anteriores.

Los aspectos ambientales de los procesos tratados en este requerimiento fueron abordados previamente en el Capítulo 7.

10.3.4.2. Indicador M8: impacto de los procesos de transporte.

El indicador M8 se centra en el estudio de todos los procesos de transporte necesarios para la construcción de una estructura de hormigón: transporte de cemento y áridos a la planta de hormigón preparado o planta de prefabricación, de acero a la planta de preparación de armaduras o planta de prefabricación, de hormigón fresco y armaduras a obra, y de piezas prefabricadas a obra. Se excluyen los transportes de materias primas a las fábricas de componentes y otros transportes de orden superior, ya que estos transportes están incluidos en los impactos producidos por dichas materias primas. Según lo visto en el Capítulo 9 (Tabla T9.2), para el tipo de hormigón estudiado los transportes supusieron más del 12% de la energía consumida, más del 6% de las emisiones de CO_2 , y más del 15% de las emisiones de VOC y SO_x . En dicho capítulo (epígrafe 9.3.4) se ha analizado el impacto de diferentes distancias de transporte.

La consideración de la prefabricación hace que se duplique la columna de puntuaciones de la Tabla T10.11, ya que en ese caso la propia planta de prefabricados hace las funciones de ferralla y planta de hormigón preparado, desapareciendo los transportes de armaduras y de hormigón fresco y siendo

sustituidos por el transporte de elementos prefabricados. Debe señalarse que en general coexistirán prefabricación y ejecución “in situ”, ya que siempre resultará necesario un mínimo de ejecución en obra para la cimentación y el montaje de los elementos prefabricados.

En el Capítulo 7 (tablas T7.6 y T7.12) se ha estimado un rango de distancias máxima, media y mínima para cada etapa de transporte, que se emplea ahora para asignar las puntuaciones correspondientes a cada una de dichas etapas. Se asigna la puntuación máxima a distancias por debajo de la estimada como mínima habitual en la industria para cada etapa, y una puntuación nula cuando la distancia supera la estimada como máxima habitual. Entre ambos límites se interpola mediante una función lineal.

El reparto de puntuaciones entre cada etapa se realiza de acuerdo con lo estudiado en el Capítulo 9 (Figura F9.10), donde se observa que la energía correspondiente al transporte de acero es marcadamente inferior a la consumida por los transportes de cemento, áridos y hormigón fresco. En el cálculo de dicha energía de transporte inciden dos variables de importancia: la cantidad de material transportado y la distancia a la que se transporta. Para la cuantía de armado tomada como base, la cantidad de acero a transportar por m³ de hormigón resulta notablemente inferior a la de los restantes componentes.

Particularizando la ecuación [E10.5] a este caso, se obtiene:

$$P^M_8 = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda^M_{8xk} \quad [E10.14]$$

Los aspectos a valorar en el indicador M8 se incluyen en la Tabla T10.11.

Aspecto a valorar	λ_{8x}^M	
	Ejecución "in situ"	Prefabricación
Distancia de transporte del cemento hasta la planta de hormigón / planta de prefabricación	$\lambda_{81}^M = 25$ (d < 50 km) $\lambda_{81}^M = 28,5 - 0,07 \cdot d$ (50 km \leq d \leq 400 km) $\lambda_{81}^M = 0$ (d > 400 km)	
Distancia de transporte del acero hasta la planta de ferralla / planta de prefabricación	$\lambda_{82}^M = 15$ (d < 100 km) $\lambda_{82}^M = 16,36 - 0,0136 \cdot d$ (100 km \leq d \leq 1200 km) $\lambda_{82}^M = 0$ (d > 1200 km)	
Distancia de transporte de los áridos hasta la planta de hormigón / planta de prefabricación	$\lambda_{83}^M = 25$ (d < 15 km) $\lambda_{83}^M = 33,3 - 0,555 \cdot d$ (15 km \leq d \leq 60 km) $\lambda_{83}^M = 0$ (d > 60 km)	
Distancia de transporte del hormigón hasta la obra	$\lambda_{84}^M = 30$ (d < 15 km) $\lambda_{84}^M = 40 - 0,666 \cdot d$ (15 km \leq d \leq 60 km) $\lambda_{84}^M = 0$ (d > 60 km)	-
Distancia de transporte de la ferralla hasta la obra	$\lambda_{85}^M = 5$ (d < 50 km) $\lambda_{85}^M = 5,166 - 0,033 \cdot d$ (50 km \leq d \leq 200 km) $\lambda_{85}^M = 0$ (d > 200 km)	-
Distancia de transporte de la planta de prefabricación hasta la obra	-	$\lambda_{86}^M = 35$ (d < 100 km) $\lambda_{86}^M = 17,5 - 0,175 \cdot d$ (100 km \leq d \leq 300 km) $\lambda_{86}^M = 0$ (d > 300 km)

Tabla T10.11.- Aspectos a valorar en el indicador M8 (impacto de los procesos de transporte) y puntuaciones λ_{8x}^M asociadas.

Por su parte, se utiliza una función de valor lineal y creciente, V_8^M , dado que no se encuentra motivo especial para emplear otro tipo de función.

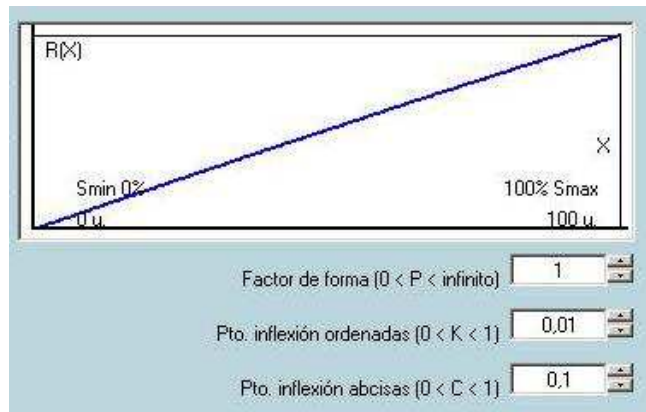


Figura F10.10.- Función de valor para el indicador M8 (impacto de los procesos de transporte).

10.3.4.3. Indicador M9: impacto de los procesos de elaboración y ejecución.

El último de los indicadores ambientales se ocupa de la preparación de hormigón, de la ejecución de la estructura en obra y de la producción de elementos de la estructura en la planta de prefabricación. Resultan de aplicación las consideraciones sobre el papel de la prefabricación expuestas en el indicador M8.

Los procesos tratados en este indicador M9 resultan de gran importancia en términos económicos y sociales, en particular la ejecución, debido a su elevada incidencia de mano de obra. No obstante, desde el punto de vista ambiental su repercusión es exigua, como se ha demostrado en los capítulos 7 y 9, y en función de ello se han establecido los coeficientes de ponderación que le afectan.

Se valoran, para la planta de hormigón, planta de prefabricación y empresa constructora, los aspectos generales ya incluidos también en la evaluación de la fabricación de componentes: certificación ambiental, reducción del consumo de agua y reciclaje de residuos.

Particularizando la ecuación [E10.5] para este caso, se obtiene:

$$F^M_9 = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda^M_{9xk} \quad [E10.15]$$

Aspecto a valorar		λ_{9x}^M	
		Ejecución "in situ"	Prefabricación
Certificación ambiental de la planta de hormigón / planta de prefabricación	Planta certificada según ISO 14001 o equivalente.	$\lambda_{91}^M = 10$	$\lambda_{91}^M = 20$
	Planta certificada según EMAS o equivalente.	$\lambda_{91}^M = 17$	$\lambda_{91}^M = 33$
Certificación ambiental de la empresa constructora	Empresa certificada según ISO 14001 o equivalente.	$\lambda_{92}^M = 10$	-
	Empresa certificada según EMAS o equivalente.	$\lambda_{92}^M = 17$	
Existencia de un sistema de reducción del consumo de agua en la planta de hormigón / planta de prefabricación		$\lambda_{93}^M = 17$	$\lambda_{93}^M = 33$
Existencia de un sistema de reducción del consumo de agua en la obra		$\lambda_{94}^M = 17$	-
Reciclaje o valorización de los residuos generados por la planta de hormigón / planta de prefabricación		$\lambda_{95}^M = 17 \cdot R_{r-v} / R_{tot}$	$\lambda_{95}^M = 33 \cdot R_{r-v} / R_{tot}$
Reciclaje o valorización de los residuos generados por la obra		$\lambda_{96}^M = 17 \cdot R_{r-v} / R_{tot}$	-

Tabla T10.12.- Aspectos a valorar en el indicador M9 (impacto de los procesos de elaboración y ejecución) y puntuaciones λ_{9x}^M asociadas.

Los aspectos a valorar en el indicador M9 se incluyen en la Tabla T10.12, siendo:

R_{r-v} : peso de los residuos de la planta enviados a valorización / reciclaje.

R_{tot} : peso de los residuos totales generados por la planta.

Finalmente, de forma similar a lo que se hacía con el indicador M7, se utiliza una función de valor V_9^M , creciente y con forma de "S" para otorgar buenas puntuaciones en zonas medias de cumplimiento de las exigencias.

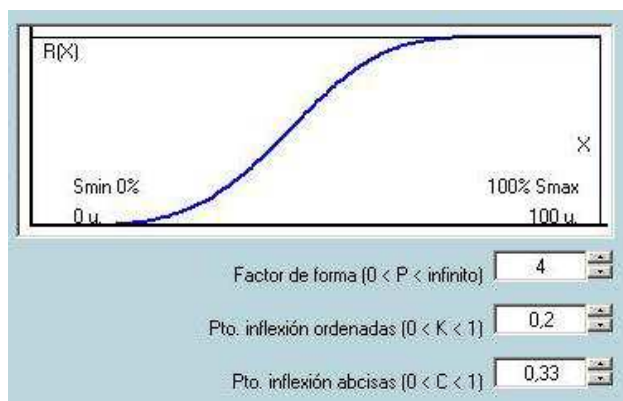


Figura F10.11.- Función de valor para el indicador M9 (impacto de los procesos de elaboración y ejecución).

10.4 ÍNDICE DE SENSIBILIDAD ECONÓMICA (ISE)

10.4.1.- Introducción

El Índice de Sensibilidad Económica (ISE) es el segundo eslabón del modelo de evaluación de la sostenibilidad desarrollado en la presente Tesis. Su objeto es representar el desempeño económico de una estructura de hormigón por medio de un índice cuyo valor oscila entre 0,00 y 1,00, de la misma forma que lo que se ha hecho con el ISMA.

Siendo análogo en concepto y similar en su formulación, la principal particularidad del ISE frente al ISMA es la existencia de una bifurcación en su árbol de requerimientos, correspondiente a un parámetro binario, como se ha mencionado ya al introducir el planteamiento general del modelo en el epígrafe 10.2.

Como se puede observar en el esquema de la Figura F10.12, el ISE se ha formado como la suma ponderada de dos requerimientos, el primero de ellos relativo a la valoración de las prestaciones ofrecidas por la estructura y el segundo centrado en la evaluación de su durabilidad.

El primer requerimiento se ha denominado “coste y prestaciones”, y consta de dos indicadores, E1 y E2, respectivamente denominados “análisis de costes” y “análisis de funcionalidad”. Su intención es valorar la adecuación de la estructura a los requerimientos expresados por el cliente en cuanto a impacto económico (costes globales) y al desempeño de los cometidos encomendados.

El segundo requerimiento se ha denominado “durabilidad”, y pretende tomar en consideración la influencia de la capacidad de la estructura para mantenerse en correcto estado de servicio durante su vida útil esperada, sobre el balance económico de su ciclo de vida. Este aspecto era representado en el Anejo 13 por el factor de extensión de vida útil (*b*) pero, tras los análisis abordados en los capítulos 8 y 9 se ha encontrado que el problema de la durabilidad resulta más complejo. Las diferentes circunstancias y necesidades que motivan la construcción de una estructura pueden determinar también la previsión de que su vida útil sea más o menos dilatada, y ello implicará la adopción de una u otra estrategia, para optimizar los recursos invertidos en la misma.

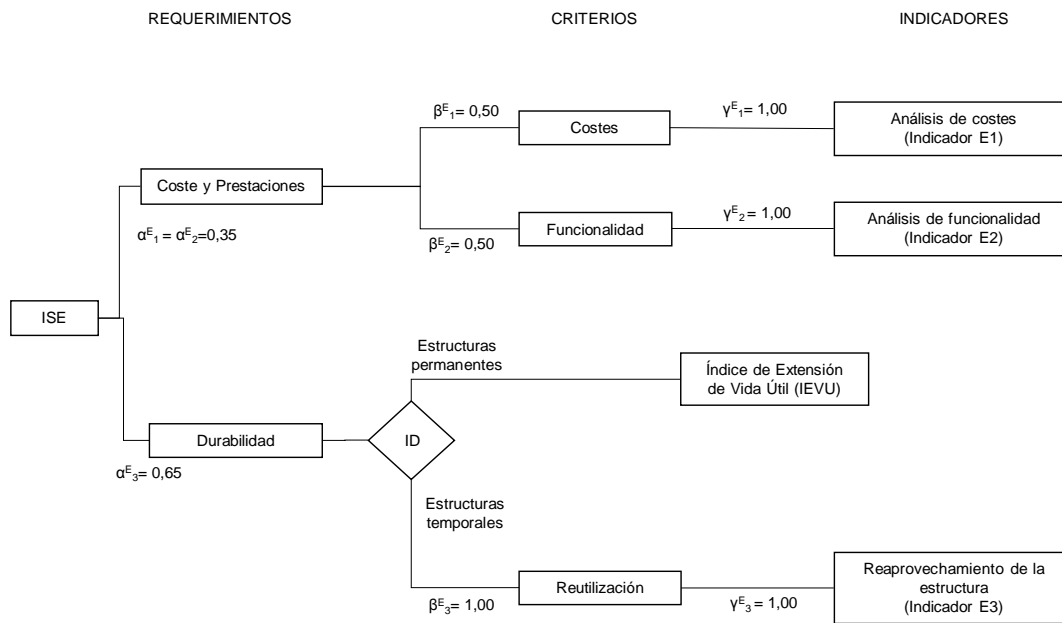


Figura F10.12.- Esquema para el cálculo del ISE

En el Capítulo 8 (epígrafe 8.3.4) se ha discutido sobre la relación entre durabilidad y sostenibilidad, estableciendo que los esfuerzos realizados en las fases de diseño y ejecución, con vistas a obtener una vida útil más dilatada, suelen verse recompensados por un coste anual equivalente más bajo, siempre y cuando las previsiones de utilización de la estructura permitan suponer que se va a mantener en servicio durante todo ese tiempo en el que sus condiciones técnicas lo permitan. Cuando una estructura se proyecta para un servicio que se va a desarrollar durante un tiempo considerablemente menor a la estimación de vida de los elementos que la forman, la aplicación de medios y recursos a la mejora de su durabilidad carece de sentido práctico. Este sería el caso de estructuras provisionales, temporales o asociadas a usos, sistemas o elementos de vida esperada muy inferior a la del hormigón.

Esta circunstancia se representa en el modelo mediante la introducción de un parámetro denominado “carácter de la estructura”, que puede tomar dos posibles valores que permiten diferenciar las estructuras “permanentes” de las “temporales”. Este parámetro se integra en el denominado “Índice de Durabilidad”, o ID.

Cuando una estructura es temporal, provisional o con previsión de uso únicamente a corto plazo, el Índice de Durabilidad conduce el proceso de evaluación hacia una rama del árbol de requerimientos en la que se valora la posibilidad de reaprovechamiento de esa estructura, una vez culminado su periodo de servicio inicial, por medio del indicador E3. En esta configuración, el ISE queda reducido a un Índice análogo al ISMA, con tres indicadores: E1, de análisis de costes, E2, de análisis de funcionalidad, y E3, de reaprovechamiento de la estructura.

En cambio, en el caso habitual de que dicha estructura tenga vocación de perdurar en el tiempo, este requerimiento se dirige hacia la evaluación de un Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU), formado nuevamente por su propio árbol de requerimientos, estructurado en tres niveles y dando lugar a seis

indicadores. Este índice sí se centra ya en evaluar en detalle el comportamiento de la estructura en materia de durabilidad, en función de sus características y de las condiciones de exposición ambiental a las que se encuentra sometida.

El IEVU devuelve un valor comprendido entre 0,00 y 1,00, que se introduce en la evaluación del ISE de una forma análoga al resultado de una función de valor de un indicador. El modelo incluye la posibilidad de aplicar un coeficiente reductor al IEVU, para reflejar la probabilidad de que la estructura finalice su periodo de servicio antes de lo esperado por causas ajenas al agotamiento de alguno de sus estados límite; por ejemplo, por obsolescencia funcional o deterioro estético del edificio o construcción de la que forme parte. Se ha denominado a este concepto “probabilidad de obsolescencia prematura”, y se abordará en epígrafes posteriores.

Las expresiones matemáticas para el cálculo del ISE son las siguientes:

$$ISE = (\alpha^E_1 \cdot \beta^E_1 \cdot \gamma^E_1 \cdot V^E_1) + (\alpha^E_2 \cdot \beta^E_2 \cdot \gamma^E_2 \cdot V^E_2) + (\alpha^E_3 \cdot ID) \quad [E10.16]$$

$$ID = c \cdot (1-POP) \cdot IEVU + (1-c) \cdot \beta^E_3 \cdot \gamma^E_3 \cdot V^E_3 \quad [E10.17]$$

Siendo:

V^E_i : coeficiente de valor obtenido para el indicador económico i.

α^E_i : coeficiente de ponderación de requerimiento correspondiente al indicador económico i.

β^E_i : coeficiente de ponderación de criterio correspondiente al indicador económico i.

γ^E_i : coeficiente de ponderación del indicador económico i.

ID: índice de durabilidad.

IEVU: índice de extensión de vida útil.

c: carácter de la estructura.

POP: probabilidad de obsolescencia prematura.

Los coeficientes de ponderación para los requerimientos, criterios e indicadores son los recogidos en la Tabla T10.13 y en las Figuras F10.1 y F10.12; en su determinación se ha considerado más relevante el requerimiento relacionado con la durabilidad que el relativo a coste y prestaciones; dentro de este último, se ponderan por igual los dos indicadores.

Las funciones de valor V^E_i siguen la ecuación [E10.4], incluyéndose sus parámetros en la Tabla T10.14.

Los parámetros c y POP, vinculados respectivamente al Índice de Durabilidad y al Índice de Extensión de Vida Útil, serán abordados en profundidad en el epígrafe correspondiente.

Coeficiente de ponderación	Valor
α^E_1, α^E_2	0,35
α^E_3	0,65
β^E_1	0,50
β^E_2	0,50
β^E_3	1,00
$\gamma^E_1, \gamma^E_2, \gamma^E_3$	1,00

Tabla T10.13: Coeficientes de ponderación para el cálculo del ISE

Indicador	Parámetro				Geometría de la función	
	K_i	m_i	n_i	A_i	Pendiente	Curvatura (*)
Análisis de costes (E1)	1,00	-0,30	0,50	7,00	Creciente	Forma "S"
Análisis de funcionalidad (E2)	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Reaprovechamiento de la estructura (E3)	1,00	-0,45	0,35	3,00	Creciente	Forma "S"

Tabla T10.14: Parámetros para las funciones de valor V^E_i .

(*) La curvatura de las funciones de valor se entiende referida al eje de ordenadas.

De modo análogo a lo ya referido en el epígrafe 10.3.1, la función representativa de un indicador económico genérico tendría la siguiente forma:

$$P^E_i = (1/100) \cdot \sum \lambda^E_{ix} \quad [E10.18]$$

Donde:

λ^E_{ix} : suma de las puntuaciones parciales que sean de aplicación al indicador a valorar.

La salida P^E_i de la función representativa de cada indicador, calculada según [E10.18], se utiliza como argumento de la función de valor para dicho indicador.

En todos los casos, puntuación máxima alcanzable para cada indicador, $\sum \lambda^E_{ix}$, es:

$$\sum \lambda^E_{ix} \leq 100 \quad [E10.19]$$

Los tres indicadores económicos, E1 (análisis de costes), E2 (análisis de funcionalidad) y E3 (reaprovechamiento de la estructura), valoran aspectos globales de la estructura considerada, por lo que no procede introducir un sumatorio ponderado para cada tipo de hormigón presente en obra, como sí ocurre en el ISMA y en el IEVU.

10.4.2. Requerimiento “coste y prestaciones”

10.4.2.1. Introducción

Ya se ha indicado que el único aspecto económico considerado por el Anejo 13 de la EHE-08 era el relativo a la durabilidad, en el sentido de que cuanto mayor fuese la vida útil de la estructura mejor sería su comportamiento de cara a la sostenibilidad, con una limitación superior, para evitar llegar a altas puntuaciones solamente basadas en este aspecto.

Sin restar importancia a lo anterior, en esta nueva propuesta se introducen otros factores a tener en cuenta dentro de la contribución de la estructura a la parte económica de la sostenibilidad. En este requerimiento se agrupan los aspectos no relacionados con la extensión de la vida útil de la estructura, y que pretenden valorar en qué medida la estructura satisface algunas de las necesidades que motivaron su construcción (evaluación de la funcionalidad) y si para ello la inversión requerida es razonable y previsible (análisis de costes).

10.4.2.2. Indicador E1: análisis de costes.

Una posible idea para definir un parámetro de costes sería la de determinar si la estructura estudiada es económica, o no, por medio de la comparación de un índice de coste (por ejemplo, €/m²) con un valor de referencia. La gran amplitud del ámbito de aplicación (tipología) de instrucciones y códigos estructurales, hace que esta idea no sea fácil de llevar a la práctica. Comparar costes de tipos estructurales muy diferentes, como pueden ser los de edificación y obra civil, no lleva ninguna parte. Incluso dentro de cada uno de estos grandes grupos existirían grandes diferencias de costes, por ejemplo, entre edificación residencial e industrial, o entre soluciones convencionales y edificios singulares. Dentro del campo de la ingeniería civil las diferencias podrían ser mucho más acusadas, dado que incluso habría que emplear otras unidades diferentes, dependiendo del tipo de obra; así, por ejemplo, €/km en infraestructuras lineales, o €/m³ en infraestructuras masivas, como presas o puentes. En realidad la cosa es más complicada todavía, porque un mismo tipo genérico de obra, como es el caso de una carretera, puede requerir muy pocas unidades de obras en plena Castilla, y muchas y muy costosas en Galicia y en la cornisa cantábrica (túneles, viaductos).

Por el contrario, sí es posible comparar entre sí varias soluciones factibles para una misma estructura, y determinar aquella que presenta un coste menor. Por ejemplo, para un edificio industrial, en cuanto a materiales y modo de ejecución: acero, madera laminada encolada (MLE), hormigón armado ejecutado in situ o prefabricado, hormigón pretensado ejecutado in situ o prefabricado; en cuanto a tipo estructural: pórticos de acero de perfiles normalizados o armados, pórticos en celosía de acero, celosías de acero sobre soportes convencionales, vigas peraltadas de MLE sobre soportes de MLE, acero u hormigón, vigas prefabricadas pretensadas apoyadas sobre soportes de hormigón armados, entre otros.

Al margen de lo anterior, se debe entender “coste” en un sentido amplio, incluyendo la inversión inicial, el mantenimiento y la disposición final de la estructura; es decir, el coste total del ciclo de vida, que es el que debería utilizarse para analizar los aspectos económicos de la sostenibilidad estructural. Esta cuestión se ha abordado en el Capítulo 8 (epígrafe 8.3.2), concluyendo que el parámetro más relevante a los efectos de la evaluación de la sostenibilidad es el coste anual equivalente.

La norma EN 15643-4:2012 “Evaluación de la sostenibilidad de los edificios – Parte 4: Marco para la evaluación del comportamiento económico” (AENOR, 2012) proporciona un formato estandarizado para determinar y expresar estos costes.

Así, en este indicador E1, de análisis de costes, se valora el hecho de estimar los costes de ciclo de vida asociados a la estructura, ya desde las fases de proyecto y ejecución, permitiendo determinar su coste anual equivalente. Se valora también que éstos se hayan tenido en cuenta a la hora de determinar la solución estructural definitiva.

Particularizando para este indicador la expresión [E10.18] se obtiene:

$$P^E_1 = (1/100) \cdot \sum \lambda^E_{1x} \quad [E10.19]$$

Los valores de λ^E_{1x} se obtienen de la Tabla T10.15.

Aspectos a valorar	λ^E_{1x}
Se justifica en el proyecto que la solución estructural adoptada es la más adecuada desde el punto de vista técnico-económico, frente a otras alternativas factibles, incluyendo una comparación de costes anuales equivalentes.	$\lambda^E_{11} = 60$
Se incluye en el proyecto y documentación final de obra (Plan de Mantenimiento) un análisis de los costes previstos para el mantenimiento preventivo o programado de la estructura, a lo largo de su vida útil.	$\lambda^E_{12} = 15$
Se incluye en el proyecto y documentación final de obra un análisis de los costes previstos para la demolición, deconstrucción o disposición final de la estructura una vez finalizada su vida útil o, en su caso, para su desmontaje y traslado.	$\lambda^E_{13} = 15$
Los costes indicados anteriormente se determinan y expresan de acuerdo con EN 15643-4:2012.	$\lambda^E_{14} = 10$

Tabla T10.15.- Aspectos a valorar en el indicador E1 (análisis de costes) y puntuaciones λ^E_{1x} asociadas.

Los parámetros asignados a este indicador en la Tabla T10.14 configuran una función de valor creciente y con forma de “S”, recogida en la Figura F10.13, en la que se necesita obligatoriamente cumplir el primero de los requisitos para optar a una buena puntuación. Esto tiene una razón clara porque, dentro de este indicador, la importancia del primer requisito es, lógicamente, muy superior a la de los restantes aspectos, que en realidad complementan al anterior.

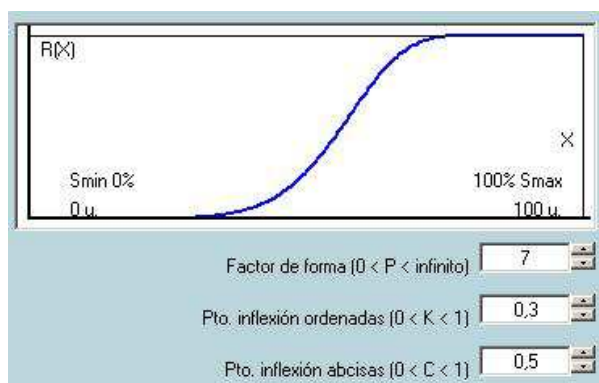


Figura F10.13.- Función de valor para el indicador E1 (análisis de costes).

10.4.2.3. Indicador E2: análisis de la funcionalidad.

Calavera (1999) afirma que la función primaria de una estructura de hormigón es la de resistir las acciones a las que estará sometida, entendiendo “resistencia” en un sentido amplio: resistencia mecánica, resistencia a las acciones ambientales, durabilidad.

La resistencia de la estructura a las cargas de diseño es un requisito fundamental, que se considera probado mediante los cálculos estructurales incluidos en la documentación del proyecto, y que no tiene objeto valorar aquí. Sí puede ser objeto de valoración el que la estructura realmente construida haya sido objeto de un re-cálculo, que certifique que puede admitir una carga máxima algo superior a la prevista inicialmente, ya que ello podría facilitar futuras modificaciones o cambios de uso. En realidad, esta situación se da con frecuencia en ingeniería estructural, puesto que tras el cálculo se realiza un dimensionamiento que implica emplear productos comerciales cuyas dimensiones y, por tanto, cuya capacidad estructural, es mayor a la estrictamente exigida por el cálculo. Dicho de otra forma, con un ejemplo: al igual que en estructuras metálicas se dimensiona con el perfil comercial que tiene capacidad resistente superior a lo que resulta del cálculo, en estructuras de hormigón se dimensiona con armaduras cuyo diámetro es superior al estrictamente necesario, no solamente debido a los escalones existentes entre diámetros comerciales, sino también a que hay algún diámetro que no se puede encontrar en determinadas zonas.

De todas formas, este incremento no debería de exceder un determinado margen, ya que de lo contrario se estaría creando una estructura excesivamente sobredimensionada, con el consiguiente perjuicio económico y ambiental. El incremento de carga máxima se valora por medio de una función lineal creciente para valores de hasta un 10%. Entre este valor y el 20% la función es decreciente, y por encima del 20% no se asigna puntuación a este aspecto.

Además, la estructura debe de ser compatible con el resto de la construcción; esto implica que, en sus condiciones de servicio, deformaciones, percepción de sus movimientos o fisuración no supongan problemas ni para los usuarios ni para los restantes elementos constructivos vinculados a la estructura: tabiquerías, pavimentos, revestimientos, instalaciones. En este sentido, es valorable que los valores máximos de las deformaciones determinados en el proyecto se encuentren por debajo de los máximos permitidos por la normativa en vigor. De forma análoga a lo ya explicado para el dimensionado por razones resistentes, también aquí en la realidad siempre hay cierto margen, por razones parecidas.

Adicionalmente, en ocasiones las estructuras pueden incorporar funciones diferentes a las anteriores, lo cual puede suponer una ventaja desde el punto de vista económico, por suponer un ahorro de materiales en otros capítulos de la obra diferentes de la estructura. De esta forma la estructura de hormigón puede asumir el papel de cerramiento, división o contención. En determinados tipos de edificios, así como en muchas obras públicas, la estructura puede quedar permanentemente a la vista, siendo conveniente en estos casos que en su diseño se hayan incorporado también condicionantes estéticos. En edificación comercial, residencial y terciaria, el empleo de un material de elevada inercia térmica como es el hormigón puede ser de ayuda para la climatización.

Este criterio pretende valorar los aspectos anteriores, asumiendo que no es fácil generalizar un parámetro de funcionalidad, que puede tener implicaciones muy diferentes según el tipo de estructura

o construcción de que se trate. Por este motivo la suma de todas las puntuaciones de la Tabla T10.16 es claramente superior a la puntuación máxima, ya que de otro modo únicamente construcciones muy determinadas podrían alcanzar los niveles máximos.

Particularizando la expresión [E10.18] para este indicador, se obtiene:

$$P^E_2 = (1/100) \cdot \sum \lambda^E_{2x} \quad [E10.20]$$

Aspectos a valorar	λ^E_{2x}
Se certifica que la estructura realmente ejecutada admite una carga de uso máxima algo superior a la originalmente especificada en proyecto, sin exceder los Estados Límite.	$\lambda^E_{21} = 6 \cdot IC \quad (0\% \leq IC \leq 10\%)$ $\lambda^E_{21} = 120 - 6 \cdot IC \quad (10\% \leq IC \leq 20\%)$ $\lambda^E_{21} = 0 \quad (IC \geq 20\%)$
Para las cargas contempladas en proyecto, los valores alcanzados de deformación en el elemento o elementos estructurales más desfavorables son inferiores a los establecidos en los Estados Límite. La obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda^E_{22} = 20 \quad (DD \leq 10\%)$ $\lambda^E_{22} = 30 \quad (10\% < DD \leq 30\%)$ $\lambda^E_{22} = 40 \quad (DD \geq 30\%)$
La estructura se ha diseñado y construido para cumplir funciones adicionales al soporte de cargas (cerramiento, división, contención, entre otras).	$\lambda^E_{23} = 25$
La estructura es visible de modo permanente (desde el interior o desde el exterior de la construcción) y se han tenido en cuenta condicionantes estéticos en su diseño, debidamente reflejados en la documentación del proyecto y satisfechos por medio de la oportuna ejecución.	$\lambda^E_{24} = 25$
La estructura puede tener un papel relevante como almacenamiento de energía térmica, y éste ha sido tenido en cuenta en el proyecto y obra, con vistas a optimizar los sistemas de climatización.	$\lambda^E_{25} = 25$

Tabla T10.16.- Aspectos a valorar en el indicador E2 (análisis de la funcionalidad) y puntuaciones λ^E_{2x} asociadas.

Los valores de λ^E_{2x} se obtienen de la Tabla T10.16, siendo:

IC: incremento porcentual de carga de uso = (carga de uso máxima de la estructura ejecutada / carga de uso máxima estructura proyectada) x 100

DD: disminución porcentual de la deformación máxima = (deformación real calculada para la estructura ejecutada / deformación máxima permitida para el elemento estructural considerado) x 100.

No encontrando motivos concluyentes para establecer prioridades entre los diferentes aspectos valorados, cuya aplicabilidad puede variar en función del tipo de estructura a evaluar, se ha optado por una función de valor lineal y creciente, recogida en la Figura F10.13, y cuyos parámetros se incluyen en la Tabla T10.14.

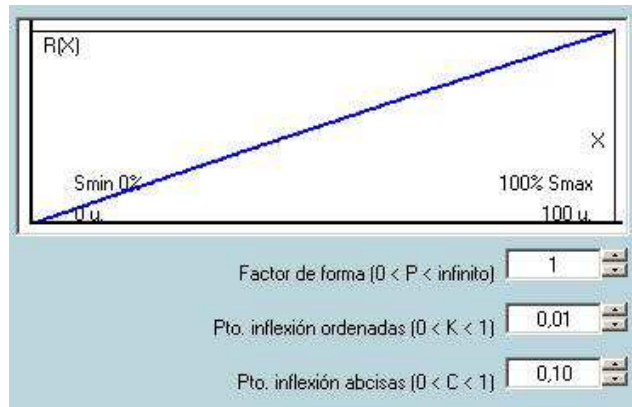


Figura F10.14.- Función de valor para el indicador E2 (análisis de la funcionalidad).

10.4.3. Requerimiento “durabilidad”

10.4.3.1. Introducción

La vida útil mínima de una estructura depende de su finalidad y características, y según el Artículo 5 de la EHE-08, puede estar comprendida entre 3 años, para estructuras temporales, y un siglo, para grandes obras de ingeniería civil y edificios singulares. Según la anterior definición de durabilidad, esta vida útil mínima se entiende como el periodo de tiempo durante el que la estructura se mantiene “íntegra” frente a los ataques exteriores. Sin embargo, existen situaciones en las que el final de la estructura puede llegar por motivos ajenos a la durabilidad física. Un ejemplo de ello son las propias “estructuras de carácter temporal” que el artículo 5 define como de vida útil nominal entre 3 y 10 años; otro son las bancadas y otras estructuras de soporte de maquinaria y equipos industriales cuya duración será, muy probablemente, inferior a la que podría alcanzar el hormigón de por sí.

Por otra parte, también existen circunstancias en las que el final del periodo de utilización de la estructura no implique su destrucción o demolición, sino que es posible la reutilización, bien sea “in situ”, bien mediante el traslado a una nueva ubicación. El reaprovechamiento de una estructura ya existente para una nueva necesidad es, con probabilidad, la alternativa estructural más sostenible de entre las existentes, siempre que sea posible llevarla a cabo sin menoscabo del cumplimiento de otros requisitos, y se compruebe que el estado de la estructura reutilizada permite cumplir la vida útil mínima que se requerirá para su nueva función; cumplido todo ello, cuando sea posible, el consumo de energía y materiales sería mínimo; esto normalmente implicaría un mínimo impacto ambiental y económico; en lo social habría que analizar caso por caso, en determinadas situaciones no necesariamente va a ser positivo, al poder generarse menos empleo, en el caso de obras públicas la cosa es diferente, por tener una misión social; de todas formas, incluso cuando socialmente la evaluación no es tan favorable como en el resto de ámbitos, lo ambiental sumado a lo económico suponen un peso superior a lo social.

En el Capítulo 8 se han hecho reflexiones, desarrolladas con más amplitud, que han llevado a valorar, en este requerimiento, la mejora de la durabilidad de una estructura por encima de los mínimos especificados por la norma. Es lo que en el Anejo 13 se denomina “Extensión de la vida Útil”. De todas formas, aquí se valora únicamente en aquellos casos en los que, en efecto, quepa esperar que la durabilidad sea la que marque el final del ciclo de vida estructural. Cuando previsiblemente la

estructura vaya a quedar fuera de servicio antes, o mucho antes del agotamiento físico y químico del material, entonces lo que debería valorarse sería su aptitud para la reutilización o reaprovechamiento.

No deja de ser cierto que si la estructura está preconcebida para un futuro reaprovechamiento, entonces su durabilidad también resulta relevante, ya que el reaprovechamiento implica una “segunda vida”, tras terminar la primera. Se omite la introducción de esta cuestión en el modelo, debido a la gran incertidumbre inherente: tal y como se ha enfocado, en el momento de evaluar la sostenibilidad de la estructura se desconoce si efectivamente va a ser reutilizada, y en qué circunstancias se volvería a emplear.

Así, este requerimiento se expresa por medio de un *Índice de Durabilidad*, definido por la expresión [E10.17], cuyo valor estará comprendido entre 0,00 y 1,00, y que se incluiría en la fórmula [E10.16] para obtener el *ISE*. El *Índice de Durabilidad*, como se refleja en la Figura F10.12, supone una bifurcación en el esquema de cálculo, realizada por medio de un parámetro denominado “carácter de la estructura”.

$$ID = c \cdot (1-POP) \cdot IEVU + (1-c) \cdot \beta_3^E \cdot \gamma_3^E \cdot V_3^E \quad [E10.17]$$

10.4.3.2. Carácter de la estructura.

El parámetro c de la fórmula [E10.17] se denomina “carácter de la estructura”, y es un valor binario que sirve para separar las estructuras “temporales” de las “permanentes”. La EHE-08 indica que “*en ningún caso se considerarán como estructuras de carácter temporal aquellas estructuras de vida útil nominal superior a 10 años*” (Art. 5).

En este caso, cabría la posibilidad de identificar como “temporales” no sólo a las estructuras a las que como tales hace referencia la Instrucción, sino también a determinados casos en los que la utilización de la estructura está muy ligada a un proyecto, instalación o proceso de previsión temporal notablemente inferior a la que podría ser la durabilidad del hormigón en las correspondientes condiciones de uso. No siendo sencillo establecer límites en este sentido, el encaje de los casos dudosos en una u otra categoría podría quedar a merced de una decisión justificada del evaluador, en función de las circunstancias particulares de cada obra.

La introducción de este parámetro permite discernir si se debe valorar la capacidad de la estructura para permanecer en servicio el mayor tiempo posible (para estructuras “permanentes”) o si, por el contrario, lo que conviene valorar son las posibilidades de adaptación y reutilización de la misma (para estructuras “temporales”). La Tabla T10.17 recoge los valores de c y su forma genérica de aplicación.

Utilización prevista de la estructura	Carácter (c)
La construcción es provisional; o tiene un periodo de vida útil inferior a 10 años; o está vinculada a una utilización con un tiempo de duración determinado de antemano, muy inferior a la durabilidad estimada para el hormigón de la estructura en sus condiciones de exposición. Todo ello deberá justificarse adecuadamente.	0
La construcción es de carácter permanente; vinculada a una utilización de duración indefinida; o a una duración determinada, pero de un orden de magnitud similar o superior a la durabilidad estimada para el hormigón de la estructura en sus condiciones de exposición.	1

Tabla T10.17: Carácter de la Estructura

10.4.3.3. Indicador E3: reaprovechamiento de la estructura.

Como se ha indicado, cuando el carácter de la estructura adquiere el valor nulo ($c = 0$), lo que se valora mediante el *Índice de Durabilidad (ID)* es la capacidad de la estructura para ser reutilizada, más allá del final de su periodo de servicio inicial. En estos casos, la reutilización sería un buen comportamiento dentro del plano económico de la sostenibilidad.

La situación ideal, y por lo tanto la que más puntuación recibe, es que la estructura permita su desmontaje y traslado. Esto puede ser más frecuente en estructuras metálicas, pero no suele ser sencillo ni habitual en estructuras de hormigón. En cualquier caso, de ser desmontable una estructura, no se requeriría que también lo fuese su cimentación, por razones obvias. Más factible es que una estructura, de cualquier tipo, sea reutilizable en su propio emplazamiento: la intención aquí es valorar que no presente “singularidades” que la hagan inútil para fines diferentes al propuesto inicialmente. También es más factible que el diseño inicial se conciba para facilitar una posible ampliación o reducción futura, en función de las necesidades. Por último, debe incentivarse también que la documentación del proyecto contemple los aspectos anteriores y contenga informaciones que faciliten su desarrollo a los futuros propietarios o usuarios.

Particularizando la ecuación [E10.17] para $c=0$, se obtiene:

$$ID = \beta_3^E \cdot \gamma_3^E \cdot V_3^E \quad [E10.21]$$

Que introducida en la fórmula [E10.16] da lugar a:

$$ISE = (\alpha_1^E \cdot \beta_1^E \cdot \gamma_1^E \cdot V_1^E) + (\alpha_2^E \cdot \beta_2^E \cdot \gamma_2^E \cdot V_2^E) + (\alpha_3^E \cdot \beta_3^E \cdot \gamma_3^E \cdot V_3^E) \quad [E10.22]$$

La expresión [E10.22] indica que en este caso el ISE se obtiene como sumatorio ponderado de tres indicadores económicos, dos de ellos ya definidos anteriormente. El indicador E3, de acuerdo con [E10.18], adopta la forma:

$$P_3^E = (1/100) \cdot \sum \lambda_{3x}^E \quad [E10.23]$$

Los valores de λ_{3x}^E se obtienen de la Tabla T10.18, siendo:

Aspectos a valorar	λ_{3x}^E
La estructura admite un cambio de uso, en su emplazamiento y configuración originales, cuando ya no existan las necesidades que motivaron su construcción.	$\lambda_{31}^E = 40$
La estructura ha sido diseñada y construida de modo que se facilite su ampliación futura (por ejemplo, nave industrial con pórticos testeros iguales a los interiores), o bien el desmantelamiento de alguna de sus partes sin afectar al resto.	$\lambda_{32}^E = 40$
La estructura admite su desmontaje, traslado y reutilización en un emplazamiento diferente al inicial.	$\lambda_{33}^E = 90$
El proyecto contiene indicaciones útiles para la adaptación, ampliación, desmontaje, traslado o desmantelamiento de la estructura.	$\lambda_{34}^E = 20$

Tabla T10.18.- Aspectos a valorar en el indicador E3 (reaprovechamiento de la estructura) y puntuaciones λ_{3x}^E asociadas.

Se toma para este indicador una función de valor creciente y con forma de “S”, en la que el punto de inflexión se encuentre en el entorno de los 40 puntos en el eje de abscisas, lo cual equivaldría a cumplir alguno de los dos primeros requisitos; con esos 40 puntos se asegura una puntuación del 50% del valor máximo. El cumplimiento de requisitos adicionales acercaría rápidamente la puntuación al valor máximo.

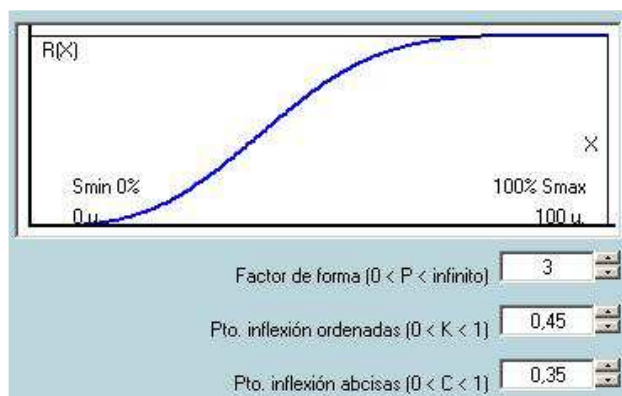


Figura F10.15.- Función de valor para el indicador E3 (reaprovechamiento de la estructura).

10.4.3.4. Probabilidad de Obsolescencia Prematura (POP).

Aún en el caso de que una estructura se haya definido como de carácter “permanente” ($c = 1$), sigue existiendo la posibilidad de que quede fuera de servicio antes de lo que sus materiales y características técnicas hubiesen permitido. Esto puede ocurrir por diferentes motivos o circunstancias. Uno de ellos ocurre cuando el avance de la tecnología y de los modos de vida de la sociedad hacen obsoleta la estructura en un plazo de tiempo más corto que el marcado como vida útil mínima en las normativas estructurales. Esta cuestión se ha abordado ya en el Capítulo 8 (epígrafe 8.3.4).

La *Probabilidad de Obsolescencia Prematura (POP)* se introduce en la expresión [E10.17] para tener en cuenta esta circunstancia. A mayor *POP*, menor será la ponderación del *Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU)*, y por lo tanto más bajo será el *Índice de Durabilidad (ID)*.

El *IEVU*, como se verá en el apartado siguiente, es el índice que valorará las características de la estructura que le permitan incrementar su vida útil por encima de los valores mínimos estipulados, en base a las soluciones de diseño, a la selección de los materiales, a los sistemas de protección del acero y del hormigón, entre otros aspectos. Tendría poco objeto esforzarse en que una estructura durase, por ejemplo, más de un siglo, cuando a todas luces es posible que mucho antes de un siglo los requerimientos que motivaron su construcción se hayan modificado lo suficiente como para necesitar una estructura diferente.

El valor mínimo de este parámetro es cero, cuando no se contempla posibilidad de obsolescencia prematura, por lo que no se minora el resultado de evaluar el Índice de Extensión de Vida Útil. El valor máximo es uno (1), cuando se tiene la seguridad de que la estructura finalizará su servicio antes del tiempo previsto, por lo que no se tendrá en cuenta la evaluación del *IEVU*; éste sería uno de los casos particulares en los que procedería adoptar un parámetro $c = 0$ aunque la estructura no fuese estrictamente “temporal”. Por razones evidentes, resulta difícil de establecer de antemano que *POP* asignar a cada tipo de estructura. Será el evaluador correspondiente el responsable de decidir el valor del parámetro, elección que deberá quedar debidamente justificada en base a las circunstancias particulares de cada caso. Por supuesto, pueden establecerse modelos en los cuales se tenga en cuenta la posible incertidumbre, empleando simulación estocástica o, simplemente, estimando más de un valor del *ICES*, en diferentes escenarios.

La Tabla T10.19 pretende servir de orientación para la elección del valor de *POP* más adecuado a cada estructura, sin que sus indicaciones hayan de ser obligatorias en ningún caso. Nótese que sólo se incluyen estructuras identificadas como “permanentes”, ya que este parámetro no es de aplicación cuando $c = 0$. De hecho, antes de asignar a una estructura un valor muy elevado de *POP* habría que revisar la elección del parámetro c , pues probablemente ésta se ajustaría mejor a la definición de estructura “temporal” que a la de “permanente”.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Tipo de Estructura	Factores a tener en cuenta	Posibles valores habituales de POP
Obras públicas (Ingeniería Civil)	<p>Tamaño (a mayor entidad de la obra más difícil será su obsolescencia).</p> <p>Naturaleza de la obra. Por ejemplo, dentro de las infraestructuras destinadas al transporte se considerarían como de mayor vigencia en el tiempo las ferroviarias o las vías de alta capacidad, mientras que las instalaciones portuarias se encuentran más ligadas a la evolución de la construcción naval (necesidad de mayor calado, nuevas modalidades de transporte, etc.).</p>	0,00 – 0,10
Estructuras de edificios institucionales (públicos o privados) singulares, monumentales y de gran tamaño.	Es muy posible que el valor arquitectónico que suele otorgarse a estas construcciones les garantice una pervivencia muy prolongada, con modificación o no de su uso inicial, por mucho que la estética sea relativamente fácil de percibir aunque difícil de ajustar a una definición técnica.	0,00 – 0,05
Estructuras de edificios institucionales y convencionales del sector terciario.	<p>Al igual que en el caso anterior, el valor arquitectónico puede ser un factor importante.</p> <p>La falta de versatilidad de su diseño de cara a un cambio de uso puede incidir negativamente en su expectativa de vida.</p> <p>Cuando el propietario es una administración pública puede existir mayor probabilidad de demolición, sea por mayor disponibilidad de recursos que en el sector privado, sea por diferente criterio a la hora de gestionar esos recursos, sea por decisiones políticas.</p>	0,00 – 0,25
Estructuras de edificios residenciales.	<p>Las construcciones de menor calidad han sido las más propensas a desaparecer antes de tiempo.</p> <p>En la actualidad, las tendencias arquitectónicas se inclinan hacia la reutilización y rehabilitación.</p> <p>Cuando la propiedad es compartida, es mucho más difícil que se pueda dar un acuerdo para la demolición prematura del edificio.</p> <p>Cuando se producen circunstancias económicas como la especulación con el precio del suelo o de la vivienda, esto puede tener gran influencia sobre la POP.</p>	0,00 – 0,30
Estructuras de edificios industriales, agrícolas o ganaderos.	<p>En general, cabe esperar que pocas estructuras ubicadas en construcciones de este tipo agoten su vida útil.</p> <p>En determinados casos, dependiendo de la ubicación, del valor arquitectónico y de la relevancia social adquirida, se puede adoptar una segunda vida con un cambio de uso, generalmente orientado hacia el sector terciario y dotacional.</p> <p>Estructuras industriales relacionadas directamente con equipos o sistemas de proceso podrían estar en el límite entre esta categoría y el ser consideradas estructuras temporales (c=0). Ejemplos de ello son bancadas y otras estructuras de soporte de maquinaria, depósitos y tanques, construcciones adaptadas "ad hoc" para un equipo determinado.</p>	0,25 – 0,75

Tabla T10.19.- Valores orientativos de la Probabilidad de Obsolescencia Prematura (POP) para distintos tipos de estructuras.

10.4.4. Índice de Extensión de la Vida Útil (IEVU)

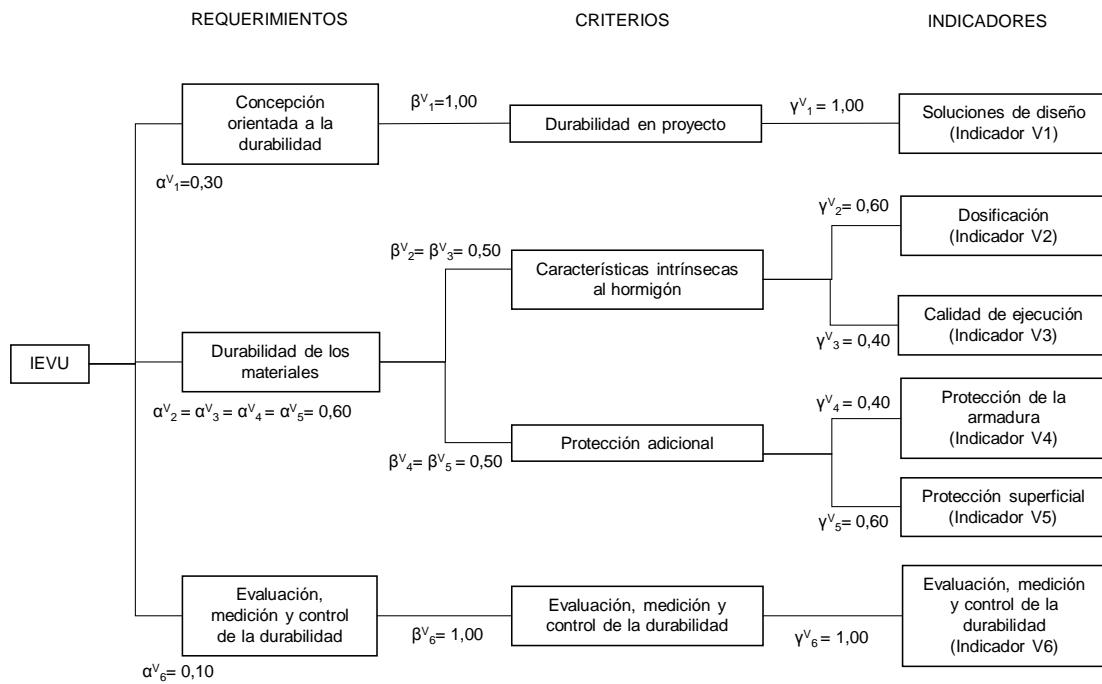


Figura F10.16: Esquema para el cálculo del IEVU

10.4.4.1. Introducción.

El Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU) tiene por objeto representar el buen desempeño de la estructura en lo referente a la durabilidad de la misma más allá del mínimo exigido. Dicho de otro modo, mide la capacidad de la estructura para poder alcanzar una vida útil superior a la establecida en la EHE-08. Sólo tiene sentido cuando la construcción es de carácter permanente ($c=1$). Este índice es la salida de un modelo de cálculo basado en MIVES y similar al utilizado en la determinación del ISMA, otorgando una puntuación global de 0 a 1.

El IEVU forma parte del proceso de cálculo del ISE, permitiendo la obtención del Índice de Durabilidad (ID), a través de la fórmula [E10.17], expresión que, cuando $c = 1$, adopta la forma:

$$ID = (1-POP) \cdot IEVU \quad [E10.24]$$

En consecuencia la expresión [E10.16] queda así:

$$ISE = (\alpha^E_1 \cdot \beta^E_1 \cdot \gamma^E_1 \cdot V^E_1) + (\alpha^E_2 \cdot \beta^E_2 \cdot \gamma^E_2 \cdot V^E_2) + (\alpha^E_3 \cdot (1-POP) \cdot IEVU) \quad [E10.25]$$

Internamente, se estructura a su vez en los niveles de requerimientos, criterios e indicadores, según un sumatorio ponderado de indicadores análogo a los ya presentados anteriormente:

$$IEVU = \sum \alpha^V_i \cdot \beta^V_i \cdot \gamma^V_i \cdot V^V_i \quad [E10.26]$$

Siendo:

V_i^V : coeficiente de valor obtenido para el indicador de extensión de vida útil i , que procede de aplicar a cada indicador su función de valor correspondiente, definida por la expresión [E10.4] y los parámetros incluidos en la Tabla T10.20.

α_i^V : coeficiente de ponderación de requerimiento correspondiente al indicador de extensión de vida útil i .

β_i^V : coeficiente de ponderación de criterio correspondiente al indicador de extensión de vida útil i .

γ_i^V : coeficiente de ponderación del indicador de vida útil i .

Los coeficientes de ponderación α^V , β^V y γ^V se recogen en la Tabla T10.21 y en la Figura F10.16, y del mismo modo que en los índices definidos con anterioridad, sus valores se han determinado de acuerdo con la importancia relativa de los aspectos tratados en cada indicador. En este caso, la base de conocimientos para dicha priorización de indicadores procede, principalmente, de la consulta de referencias bibliográficas especializadas. En el Capítulo 2 se ha realizado un breve resumen de parte de la información consultada.

Con carácter general, los principios seguidos a la hora de definir este índice son, por un lado, valorar únicamente todo aquello que, no siendo ya obligatorio o preceptivo según la EHE-08, suponga mejora o incremento de la vida útil de la estructura. Por otro, diferenciar los aspectos a valorar en función de la clase de exposición a que esté sometida la estructura, dado que se necesitan medidas de mayor calado para aumentar la vida útil de una estructura situada en ambiente agresivo que para una no sometida a ataques.

En el primer requerimiento, denominado “Concepción orientada a la durabilidad”, se valoran aspectos del proyecto y del diseño que pueden condicionar la durabilidad, constando de un único indicador (V1), que no tiene que ver con los materiales, sino con el mero diseño conceptual geométrico y de otros aspectos cuya inadecuación suele llevar a problemas importantes de durabilidad. El requerimiento “Durabilidad de los materiales” agrupa a todos los aspectos constructivos de la estructura que tienen influencia directa en su durabilidad, y consta de cuatro indicadores (V2, V3, V4, V5), relacionados con la dosificación del hormigón, con su ejecución, con su protección superficial y con la protección de las armaduras. Por último, el requerimiento “Evaluación de la durabilidad” valora, por medio de un único indicador V6, los diferentes cálculos, ensayos, mediciones y acciones para estimar la vida útil de la estructura, comprobar que su ejecución ha sido adecuada y garantiza la durabilidad deseada, y poner la bases de su seguimiento, control y mantenimiento.

Se ha asignado el mayor peso ($\alpha^V = 0,60$) al requerimiento “Durabilidad de los materiales”, ya que es el que contiene los cuatro indicadores relacionados con los aspectos que más van a afectar a la resistencia del hormigón frente a agresiones externas a las que se verá sometido durante su vida útil. El segundo requerimiento en cuanto a su importancia es el dedicado a la concepción estructural ($\alpha^V = 0,30$), porque un fallo en la misma puede acarrear problemas de mantenimiento y durabilidad en el futuro. El requerimiento “Evaluación de la durabilidad” tiene un peso reducido ($\alpha^V = 0,10$), acorde con los aspectos que incluye, que se explicarán en detalle más adelante.

Indicador	Parámetro				Geometría de la función	
	K_i	m_i	n_i	A_i	Pendiente	Curvatura (*)
Soluciones de diseño (V1)	2,19	-0,20	0,80	5,00	Creciente	Cóncava
Dosificación del hormigón (V2)	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Ejecución del hormigón (V3)	1,22	-0,20	0,70	6,00	Creciente	Cóncava
Protección superficial (V4)	3,86	-0,30	1,00	2,00	Creciente	Cóncava
Protección de las armaduras (V5)	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Evaluación, medición y control de la durabilidad (V6)	1,00	-0,55	0,55	6,00	Creciente	Forma "S"

Tabla T10.20: Parámetros para las funciones de valor V_x .

(*) La curvatura de las funciones de valor se entiende referida al eje de ordenadas.

Coefficiente de ponderación	Valor	Coefficiente de ponderación	Valor
α^V_1	0,30	γ^V_1	1,00
$\alpha^V_2, \alpha^V_3, \alpha^V_4, \alpha^V_5$	0,60	γ^V_2	0,60
α^V_6	0,10	γ^V_3	0,40
β^V_1	1,00	γ^V_4	0,40
β^V_2, β^V_3	0,50	γ^V_5	0,60
β^V_4, β^V_5	0,50	γ^V_6	1,00
β^V_6	1,00		

Tabla T10.21: Coeficientes de ponderación para el cálculo del IEVU

En los indicadores que forman parte de este índice, las puntuaciones λ^V_{ix} pueden diferir en función de la clase de exposición a la que se encuentre sometido cada elemento de la estructura. Además, es posible la coexistencia dentro de una misma estructura de elementos sometidos a clases de exposición diferentes. Por este motivo es necesario calcular por separado las puntuaciones parciales para cada clase de exposición, y obtener la puntuación total por medio del sumatorio de las anteriores, ponderadas según el porcentaje de hormigón correspondiente a cada clase o grupo de clases de exposición sobre el total de hormigón de la estructura.

La función representativa de un indicador genérico de este índice tendría la forma:

$$P^V_i = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda^V_{ixk} \quad [E10.27]$$

Donde:

p_k : porcentaje de hormigón presente en obra sometido al k-ésimo grupo de clases de exposición.

λ^V_{ixk} : suma de las puntuaciones parciales que sean de aplicación a los elementos sometidos al k-ésimo grupo de clases de exposición.

La salida P_i^V de la función representativa de cada indicador se utiliza como argumento de la función de valor para dicho indicador, entrando con ella en el eje de abscisas.

En todos los casos, al igual que antes, la puntuación máxima alcanzable para cada indicador, $\sum \lambda_{ix}^V$, es

$$\sum \lambda_{ix}^V \leq 100 \quad [E10.28]$$

En cada uno de los indicadores se agrupan las clases de exposición de forma diferente, en función de los aspectos valorados por el indicador. Cuando una estructura, o parte de ella, pueda estar sometida a combinaciones de clases de exposición generales y específicas, consideradas en las tablas por separado, deberá de evaluarse la puntuación total según cada una de las columnas y tomar la media de estos valores como argumento de entrada en la función de valor V_i^V . Por ejemplo, para una estructura sometida a ambiente IIa +Qb +E según la EHE-08, en el indicador V2 sería necesario evaluarla según las columnas segunda y sexta de la tabla T10.23, y posteriormente obtener el valor medio de ambas puntuaciones.

Asimismo, como se puede ver en las tablas T10.23, T10.26 y T10.27, en algunos casos la puntuación asignada a un aspecto determinado, dentro de un indicador, puede variar en función de que se trate de hormigón en masa (HM), armado (HA) o pretensado (HP).

10.4.4.2. Indicador V1: soluciones de diseño.

Este indicador es el único que existe en el requerimiento “Concepción orientada a la durabilidad”, y en él se valoran aspectos relacionados con la concepción y el diseño de formas estructurales, así como con la incorporación al proyecto de criterios y especificaciones con relevancia en la durabilidad.

En Vieitez y Ramírez (1984) y del Río (2008) se hace referencia a estudios sobre patologías estructurales que indican que, en España, un porcentaje predominante de las estructuras que han precisado reparación presentaban errores de concepción, proyecto o diseño, lo que da idea de la importancia que puede llegar a cobrar este requerimiento.

En general, si el proyectista tiene en cuenta los aspectos indicados durante la fase de elaboración del proyecto de ejecución, es relativamente sencillo alcanzar la puntuación máxima.

Particularizando la expresión [E10.27] para este caso, se obtiene:

$$P_1^V = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{1xk}^V \quad [E10.29]$$

Siendo p_k el porcentaje de hormigón sometido a cada grupo de clases de exposición y λ_{1xk}^V las puntuaciones recogidas en la Tabla T10.22.

Se diferencia únicamente entre dos grupos de clases de exposición, siendo la puntuación más exigente para ambientes agresivos, valorando aspectos que no se contemplan habitualmente en condiciones de baja agresividad. No se diferencia entre hormigón en masa, armado o pretensado.

Aspectos a valorar	λ_{1x}^V	
	Clase de exposición	
	Agresividad escasa (I, IIb)	Agresividad moderada / alta (IIa, IIIa, IIIb, IIIc, IV / cualquier clase específica)
El proyecto identifica los puntos de la estructura más propensos a la acumulación de agua, polvo y otros materiales que perjudican la durabilidad, e incluye medidas para evitar los riesgos derivados (drenajes, goterones, sistemas autolavantes, etc.) y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda_{11}^V = 40$	$\lambda_{11}^V = 30$
El proyecto identifica zonas de riesgo de aparición de fisuras por contracción / retracción (elevada relación superficie / volumen, cambios bruscos de sección, unión de elementos de muy diferente rigidez, etc.) e incluye medidas correctoras (juntas, etc.) y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda_{12}^V = 40$	$\lambda_{12}^V = 30$
El proyecto incluye la verificación de que no existen materiales incompatibles (pares galvánicos) en ningún punto de la estructura y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda_{13}^V = 20$	$\lambda_{13}^V = 20$
Durante la fase de diseño se ha tenido en cuenta la temperatura media anual a la hora de considerar los factores que afectan a la durabilidad.	-	$\lambda_{14}^V = 10$
Durante la fase de diseño se ha dispuesto de información relativa a la naturaleza y concentración de agentes agresivos presentes en el medio (análisis de aguas, procesos industriales, estudios de suelos, etc.).	-	$\lambda_{15}^V = 10$

Tabla T10.22.- Aspectos a valorar en el indicador V1 (soluciones de diseño) y puntuaciones λ_{1x}^V asociadas.

La función de valor determinada por los parámetros de la Tabla T10.20 es creciente y cóncava con respecto al eje de ordenadas (Figura F10.17), de modo que se requiere un elevado grado de cumplimiento de requerimientos para alcanzar una buena puntuación en el indicador. En realidad, la mayor parte de los requisitos establecidos son relativamente sencillos de cumplir y su coste adicional es reducido o nulo; estos requisitos tienen su origen en la fase de proyecto. A partir de ahora cuando se indique que una curva es cóncava o convexa se refiere a que lo es con respecto al eje de ordenadas.

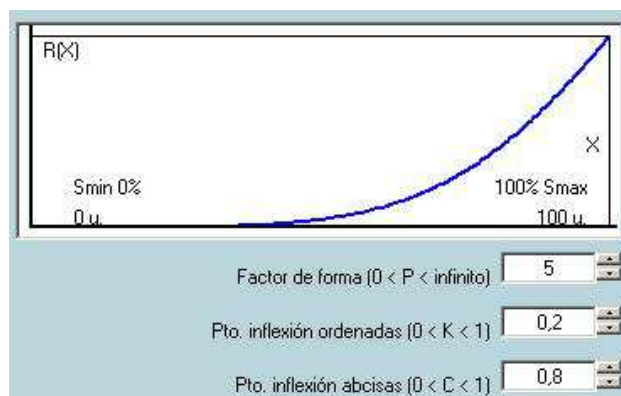


Figura F10.17.- Función de valor para el indicador V1 (soluciones de diseño).

10.4.4.3. Requerimiento “durabilidad de los materiales”

10.4.4.3.1. Introducción.

En este requerimiento se agrupan los aspectos técnicos del hormigón que están directamente relacionados con la resistencia a los ataques físicos, químicos o de otro tipo a los que se encontrarán sometidos las estructuras a lo largo de su vida útil, y que pueden ser causa del final de la misma, incluso mucho antes de los plazos considerados en proyecto.

Existen multitud de factores a considerar en este sentido, expuestos brevemente en el Capítulo 2. Para organizar su evaluación, se han repartido en dos criterios y un total de cuatro indicadores. Los dos criterios han recibido el mismo peso en la ponderación ($\beta^V = 0,50$), al no observarse motivos claros para establecer un reparto diferente.

El criterio “características intrínsecas al hormigón” recoge los aspectos vinculados a la propia naturaleza del material, evaluando la consideración de la durabilidad a la hora de definir la dosificación del hormigón (indicador V2) o durante los procesos de ejecución, sea en obra, sea en una instalación de prefabricación (indicador V3). Se valora como más importante la dosificación ($\gamma^V = 0,60$) frente a la ejecución ($\gamma^V = 0,40$), habida cuenta de que en ella se incluyen aspectos fundamentales como la relación agua / cemento (a/c), el contenido en cemento o la inclusión de adiciones.

Dentro de las “características de protección adicional” se incluyen otras medidas para incrementar la durabilidad y la resistencia a los ataques, diferenciando entre la protección de la superficie exterior del hormigón (indicador V4), con una ponderación $\gamma^V = 0,40$, y la protección interior de las armaduras frente a la corrosión (indicador V5), con una ponderación $\gamma^V = 0,60$. Este mayor peso se debe a que los problemas derivados de la corrosión del acero son, según la literatura existente, los más generalizados entre las patologías que afectan al hormigón.

10.4.4.3.2. Indicador V2: dosificación del hormigón.

Este indicador tiene por finalidad valorar los aspectos relacionados con la dosificación o composición del hormigón y que pueden influir en la durabilidad del mismo.

La EHE-08 especifica unos valores mínimos de contenido en cemento, relación a/c y resistencia a compresión, en función de la clase de exposición (tablas 37.3.2.a y 37.3.2.b). Para ambientes agresivos, estos valores pueden ser menos exigentes que los citados en referencias como Al-Rabiah (1990) y Gjørv (2009).

El empleo de adiciones y su relación con la durabilidad han sido objeto de múltiples estudios, entre los que se pueden citar los de Polder (1996), Osborne (1999), Molina (2008), Garcés et al. (2010) y Aponte et al. (2012). Su capacidad para mejorar determinadas propiedades del hormigón depende del tipo de adición, del tipo de ambiente a que está sometido la estructura y del porcentaje de sustitución. Los cementos de las clases CEM II, CEM III, CEM IV y CEM V incorporan adiciones en su composición, detallando la EHE-08 los casos y tipos de hormigón a que son aplicables. Otra posibilidad es añadir la adición a cemento CEM I durante la preparación del hormigón, caso en el que

sería aconsejable disponer de un estudio que establezca la compatibilidad entre el cemento y el material de adición.

Este indicador premia, con carácter general, el empleo de relaciones a/c bajas, contenidos de cemento equivalente elevados y un alto porcentaje de sustitución de clinker por adiciones; cuando se habla de contenido de cemento equivalente se está haciendo referencia a la suma del contenido en cemento más el contenido en adiciones, ponderado por su eficacia cementante. Para hormigones sometidos a ambientes agresivos o muy agresivos, se valora además la utilización de otros aditivos: inhibidores de corrosión, polímeros, áridos de especial dureza.

Al valorar el empleo de aditivos inhibidores de la corrosión se están considerando los añadidos al conjunto de la masa de hormigón fresco. El empleo de aditivos de aplicación superficial sobre el hormigón endurecido se tratará dentro del indicador de protección superficial. No se puntúa el empleo de aditivos inclusores de aire para hormigones expuestos a bajas temperaturas (clases H y F) debido a que es ya obligatorio según el Art. 37 de la EHE-08.

Particularizando la ecuación [E10.27] a este caso se obtiene:

$$P_2^V = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{2xk}^V \quad [E10.30]$$

Siendo p_k el porcentaje de hormigón sometido a cada grupo de clases de exposición y λ_{2x}^V las puntuaciones recogidas en la Tabla T10.23.

Las puntuaciones asignadas a cada aspecto cambian según la clase de exposición, de forma que en ambientes más exigentes sea necesario tomar mayor número de medidas de protección para alcanzar la puntuación máxima. Según el caso, se puede diferenciar la puntuación entre hormigón en masa, armado y pretensado.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Aspectos evaluables		λ_{2x}^V					
		Clase de exposición					
		Agresividad escasa (I, IIb)	Agresividad moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / las anteriores + Qa, Qb)	Agresividad elevada (IIIc / cualquier clase general + Qc)	H	F	E
Se utiliza una relación a/c inferior a la máxima indicada por la EHE-08 para el caso de aplicación	a/c inferior a a/c_{max} hasta en un 5%	$\lambda_{21}^V = 15$	$\lambda_{21}^V = 15$ (HM) $\lambda_{21}^V = 10$ (HA, HP)	$\lambda_{21}^V = 10$	$\lambda_{21}^V = 20$	$\lambda_{21}^V = 20$ (HM) $\lambda_{21}^V = 15$ (HA, HP)	$\lambda_{21}^V = 10$
	a/c inferior a a/c_{max} en más del 5%	$\lambda_{21}^V = 25$	$\lambda_{21}^V = 30$ (HM) $\lambda_{21}^V = 20$ (HA, HP)	$\lambda_{21}^V = 20$	$\lambda_{21}^V = 40$	$\lambda_{21}^V = 40$ (HM) $\lambda_{21}^V = 35$ (HA, HP)	$\lambda_{21}^V = 20$
Se utiliza un contenido en cemento equivalente superior al mínimo indicado por la EHE-08 para el caso de aplicación	Se supera el cont. mínimo hasta en un 10%	$\lambda_{22}^V = 15$	$\lambda_{22}^V = 15$ (HM) $\lambda_{22}^V = 10$ (HA, HP)	$\lambda_{22}^V = 10$	$\lambda_{22}^V = 20$	$\lambda_{22}^V = 20$ (HM) $\lambda_{22}^V = 15$ (HA, HP)	$\lambda_{22}^V = 10$
	Se supera el cont. mínimo en más de un 10%	$\lambda_{22}^V = 25$	$\lambda_{22}^V = 30$ (HM) $\lambda_{22}^V = 20$ (HA, HP)	$\lambda_{22}^V = 20$	$\lambda_{22}^V = 40$	$\lambda_{22}^V = 40$ (HM) $\lambda_{22}^V = 35$ (HA, HP)	$\lambda_{22}^V = 20$
Se emplean cementos con adiciones, según RC-16	CEM II, III, IV, V / A	$\lambda_{23}^V = 20$ (HM, HA) $\lambda_{23}^V = 35$ (HP)	$\lambda_{23}^V = 20$ (HM) $\lambda_{23}^V = 15$ (HA) $\lambda_{23}^V = 30$ (HP)	$\lambda_{23}^V = 10$ (HM, HA) $\lambda_{23}^V = 25$ (HP)	-	-	$\lambda_{23}^V = 15$
	CEM II, III, IV, V / B	$\lambda_{23}^V = 35$ (HM, HA) - (HP)	$\lambda_{23}^V = 35$ (HM) $\lambda_{23}^V = 30$ (HA) - (HP)	$\lambda_{23}^V = 25$ (HM, HA) - (HP)	-	-	$\lambda_{23}^V = 25$ (HM, HA) - (HP)
Se emplean adiciones al hormigón recogidas en RC-16 (cenizas volantes, humo de sílice), existiendo ensayos de dosificación positivos para la combinación.	La adición supone hasta un 15% en peso del material cementante	$\lambda_{24}^V = 20$	$\lambda_{24}^V = 20$ (HM) $\lambda_{24}^V = 15$ (HA, HP)	$\lambda_{24}^V = 10$	-	-	$\lambda_{24}^V = 15$
	La adición supone más de un 15% en peso del material cementante	$\lambda_{24}^V = 35$	$\lambda_{24}^V = 35$ (HM) $\lambda_{24}^V = 30$ (HA, HP)	$\lambda_{24}^V = 25$	-	-	$\lambda_{24}^V = 25$
Se añade a la dosificación del hormigón un aditivo inhibidor de la corrosión.	-	-	$\lambda_{25}^V = 20$ (HA, HP) - (HM)	$\lambda_{25}^V = 30$ (HA, HP) - (HM)	$\lambda_{25}^V = 10$ (HA, HP) - (HM)	$\lambda_{25}^V = 30$ (HA, HP) - (HM)	$\lambda_{25}^V = 5$ (HA, HP) - (HM)
Se añaden polímeros a la dosificación del hormigón, bien en forma de fibras, bien como sustitutivo del cemento (resinas epoxídicas).	-	-	$\lambda_{26}^V = 10$ (HM) $\lambda_{26}^V = 5$ (HA, HP)	$\lambda_{26}^V = 20$	$\lambda_{26}^V = 20$	$\lambda_{26}^V = 20$	$\lambda_{26}^V = 5$
Se añaden aditivos superplastificantes a la dosificación del hormigón.	$\lambda_{27}^V = 15$	-	$\lambda_{27}^V = 10$ (HM) $\lambda_{27}^V = 5$ (HA, HP)	$\lambda_{27}^V = 20$	$\lambda_{27}^V = 20$	$\lambda_{27}^V = 20$	$\lambda_{27}^V = 5$
Se emplean áridos de prestaciones superiores a las indicadas en EHE-08.	-	-	-	-	-	-	$\lambda_{28}^V = 30$

Tabla T10.23.- Aspectos a valorar en el indicador V2 (dosificación del hormigón) y puntuaciones λ_{2x}^V asociadas.

Dado que existen una gran cantidad de aspectos a valorar y no se encuentran razones para otro tipo de geometría, se adopta una función de valor lineal y creciente, reflejada en la Figura F10.18, cuyos parámetros se incluyen en la Tabla T10.20.

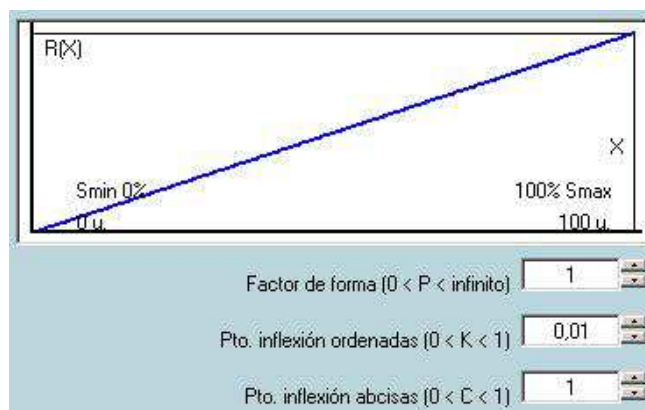


Figura F10.18: Función de valor para el indicador V2 (dosificación del hormigón).

10.4.4.3.3. Indicador V3: ejecución de la estructura.

Este indicador tiene por finalidad valorar los aspectos de la ejecución de la estructura que pueden influir en su durabilidad. En particular se centra en el curado y en la adopción de recubrimientos superiores a los mínimos exigidos. Se valora además positivamente la prefabricación de elementos en taller, de forma proporcional al porcentaje de hormigón prefabricado sobre el total.

El curado es un proceso de gran importancia en la durabilidad del hormigón, como remarcan López et al. (1991), Al-Assadi et al (2008), Fernández (2010) o D'Andrea (2010), entre otros muchos. Leves variaciones en las condiciones de curado, como se indica en López et al. (1991), pueden tener efectos posteriores de importancia en la corrosión de las armaduras, ya que se podría condicionar de esta forma el mecanismo que controla el proceso de corrosión del acero en estado activo. El curado afecta también de forma muy importante a otras propiedades interiores y superficiales, como son la resistencia del recubrimiento, resistencia a la abrasión, permeabilidad, estabilidad de volumen o resistencia a los ciclos de hielo-deshielo, tal como nos recuerdan Al-Assadi et al. (2008) y Fernández (2010). Un curado adecuado durante los primeros días puede ser decisivo para conseguir mejoras en cuanto a permeabilidad. La prolongación del tiempo curado puede disminuir la profundidad de carbonatación.

La duración del proceso de curado, referida al tiempo necesario para alcanzar la resistencia característica, supone la puntuación más importante de este indicador. Dicha puntuación es proporcional a la duración del curado; se hace que su importancia sea mayor en las clases de exposición I y IIb por varios motivos. En primer lugar, es más necesario atender al curado en ambientes secos que, por ejemplo, en entorno marino, donde la humedad ambiental ya es muy alta. Por otro lado, en estos ambientes poco agresivos no se incentiva el empleo de recubrimientos superiores a los mínimos prescritos. Finalmente, según Day (2010), el desarrollo de la impermeabilidad del hormigón requiere más tiempo cuanto más elevada sea la relación a/c.

Se incentiva el empleo de sistemas de curado de alta eficiencia; es decir, aquellos que permiten un control de la humedad de la masa de hormigón más estricto que los métodos habitualmente empleados en obra. También se valora positivamente el empleo de encofrados de permeabilidad controlada, descritos en Day (2010) y el control en tiempo real del curado por medio de ensayos (como los de resistividad eléctrica, entre otros). Se tiene en cuenta que estos sistemas son mucho más habituales en prefabricación que en construcción convencional.

El espesor del recubrimiento es un parámetro decisivo en la durabilidad, y la EHE-08 prescribe espesores mínimos de recubrimiento según la clase de exposición, el tipo de cemento empleado, su resistencia y la vida útil de proyecto (tablas 37.2.4.1.a, b y c).

En este indicador V3 se otorgan mayores puntuaciones al incremento de los recubrimientos en los ambientes más agresivos, con vistas a incentivar esta opción; para hormigones expuestos a ambientes especialmente agresivos, Burón et al. (2011) proponen una modificación de las tablas de recubrimientos incluidas en la EHE-08, con mayores espesores, según el caso. El incremento excesivo de los recubrimientos puede ser contraproducente desde el punto de vista económico y ambiental, por lo que este aspecto se valora por medio de una función triangular que otorga la puntuación máxima a un incremento del 30% sobre el recubrimiento indicado en la EHE.

La prefabricación de elementos de la estructura supone una puntuación adicional para cualquier clase de exposición, debido a las mejores condiciones de ejecución que suele haber en fábrica, bajo un mayor control que el que se puede ejercer in situ. Esta puntuación se añade a las anteriores por ser complementaria, ya que también pueden concurrir en la prefabricación; este es el caso del curado al vapor (alta eficiencia).

Particularizando la ecuación [E10.27] para este caso, se obtiene:

$$P_3^V = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{3xk}^V \quad [E10.31]$$

Siendo p_k el porcentaje de hormigón sometido a cada grupo de clases de exposición y λ_{3xk}^V las puntuaciones recogidas en la Tabla T10.24.

Aspectos a valorar		λ_{3x}^V		
		Clase de exposición		
		Agresividad escasa (I, IIb)	Agresividad moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / cualquiera de las anteriores +Qa, Qb, H)	Agresividad elevada (IIIc / cualquier clase general + Qb, Qc, F, E)
Duración del periodo de curado controlado del hormigón (% sobre el tiempo necesario para alcanzar f_{ck})		$\lambda_{31}^V = 70 \cdot (\%t_c / 100)$	$\lambda_{31}^V = 60 \cdot (\%t_c / 100)$	$\lambda_{31}^V = 50 \cdot (\%t_c / 100)$
Inclusión en el proyecto de especificaciones relativas a los tiempos y procedimientos de curado, en función de los elementos de obra.		$\lambda_{32}^V = 5$	$\lambda_{32}^V = 5$	$\lambda_{32}^V = 5$
Empleo de sistemas de ejecución avanzados (curado de alta eficiencia o al vapor, encofrados de permeabilidad controlada, control del curado en tiempo real mediante ensayos eléctricos, etc.)		$\lambda_{33}^V = 10$	$\lambda_{33}^V = 10$	$\lambda_{33}^V = 10$
Recubrimientos superiores a los mínimos indicados en EHE-08	Incremento de hasta un 30%	-	$\lambda_{34}^V = 33.3 \cdot (\Delta R / R_{EHE})$	$\lambda_{34}^V = 50 \cdot (\Delta R / R_{EHE})$
	Incremento entre el 30% y el 60%	-	$\lambda_{34}^V = 40 - 133.3 \cdot (\Delta R / R_{EHE})$	$\lambda_{34}^V = 50 - 83.3 \cdot (\Delta R / R_{EHE})$
Adopción de un nivel de control intenso.		$\lambda_{35}^V = 20$	$\lambda_{35}^V = 15$	$\lambda_{35}^V = 15$
Se fija una apertura máxima de fisura inferior a la indicada en EHE-08.		$\lambda_{36}^V = 5$	$\lambda_{36}^V = 5$	$\lambda_{36}^V = 5$
Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas a los encofrados y al tiempo de desencofrado, en función de los elementos de obra.		$\lambda_{37}^V = 5$	$\lambda_{37}^V = 5$	$\lambda_{37}^V = 5$
Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas al vertido y compactación del hormigón (conveniencia del bombeo, tipo y tamaño adecuados de vibrador, etc), en función de los elementos de obra.		$\lambda_{38}^V = 5$	$\lambda_{38}^V = 5$	$\lambda_{38}^V = 5$
Porcentaje de hormigón prefabricado sobre el total de la estructura.		$\lambda_{39}^V = 20 \cdot (M_{pref} / M_{tot})$	$\lambda_{39}^V = 20 \cdot (M_{pref} / M_{tot})$	$\lambda_{39}^V = 20 \cdot (M_{pref} / M_{tot})$

Tabla T10.24.- Aspectos a valorar en el indicador V3 (ejecución de la estructura) y puntuaciones λ_{3x}^V asociadas.

Siendo:

$\%t_c = (\text{tiempo de curado, en días} / 28) \times 100$.

ΔR : espesor de recubrimiento adicional, sobre el mínimo estipulado por EHE-08.

R_{EHE} : espesor de recubrimiento mínimo especificado en EHE-08.

M_{tot} : peso total de la estructura considerada

M_{pref} : peso del conjunto de elementos prefabricados que forman parte de la estructura.

Dada la fuerte influencia sobre la durabilidad que la literatura existente otorga al curado, se propone para este indicador una función de valor creciente, cóncava y con fuerte pendiente, que requiera un cumplimiento elevado del primer requisito para obtener una buena puntuación. Dicha curva aparece reflejada en la Figura F10.19, y sus parámetros se recogen en la Tabla T10.20.

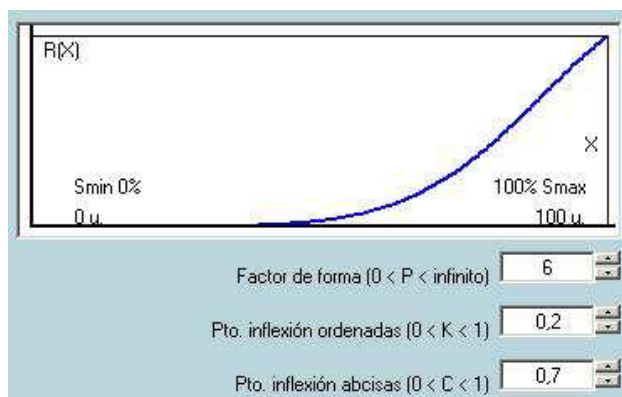


Figura F10.19.- Función de valor para el indicador V3 (ejecución de la estructura).

10.4.4.3.4. Indicador V4: protección superficial del hormigón.

Este indicador valora la adopción de sistemas de protección superficial del hormigón, que disminuyan la penetración de humedad y agentes agresivos en el seno del mismo. Al tratarse de medidas de protección que se consideran necesarias únicamente en ambientes agresivos o extremos, para los ambientes no agresivos se otorga una puntuación elevada a pesar de que no se empleen medidas de este tipo, con objeto de no penalizar a las estructuras que no lo requieren, como las de clase de exposición I, por ejemplo. También se incluye en este indicador el empleo de protecciones pesadas en hormigones sometidos a abrasión mecánica (clase E).

Los productos de protección superficial pretenden prevenir o retardar la penetración de agentes agresivos, haciendo el hormigón menos permeable a los cloruros, reduciendo el contenido de humedad, o combinando ambos efectos. Estos tratamientos pueden cubrir de forma continua la superficie exterior del hormigón, proteger de la entrada de agua la superficie interior de los poros, o sellar los poros capilares. También existen protecciones basadas en la aplicación de una capa densa de un material cementante (Gjorv, 2009). Wheat (2002), Almusallam et al. (2003) y García et al. (2010) ofrecen más información sobre estos aspectos.

Para los ambientes de agresividad escasa se puede obtener una puntuación elevada sin necesidad de emplear medidas adicionales de protección superficial. Si se emplea alguna de estas medidas, las puntuaciones asociadas a ellas se suman a la puntuación base, correspondiente a no aplicar protección alguna. En todos los casos se valora positivamente que el Plan de Mantenimiento incluya indicaciones relativas a la protección superficial.

El empleo de protección pesada y el incremento de la dureza superficial se valoran únicamente para hormigones con peligro de agresión mecánica, con clase de exposición específica E.

Particularizando la ecuación [E10.27] a este caso, se obtiene:

$$P_4^V = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{4xk}^V \quad [E10.32]$$

Siendo p_k el porcentaje de hormigón sometido a cada grupo de clases de exposición y λ_{4xk}^V las puntuaciones recogidas en la Tabla T10.25.

Aspectos a valorar	λ_{4x}^V		
	Clase de exposición		
	Agresividad escasa (I, IIb)	Agresividad de origen químico (IIa, IIIa, IIIb, IIIc, IV / cualquier clase general +Qa, Qb, Qc, F)	Agresividad de origen mecánico (cualquier clase general +E)
No se adopta ninguna medida especial de protección superficial.	$\lambda_{41}^V = 80 (*)$	-	-
Se aplica una protección superficial de eficacia media (acrílica, caucho clorado, emulsión polimérica, etc.).	$\lambda_{42}^V = 10 (**)$	$\lambda_{42}^V = 30$	-
Se aplica una protección superficial de eficacia elevada (resina epoxi, poliuretano, etc.).	$\lambda_{43}^V = 20 (**)$	$\lambda_{43}^V = 50$	-
Se aplica superficialmente un inhibidor de corrosión migratorio.	$\lambda_{44}^V = 10 (**)$	$\lambda_{44}^V = 30$	-
Se emplea una protección pesada frente a acciones mecánicas (asfalto, vidrio, gres, goma, acero, etc.).	-	-	$\lambda_{45}^V = 50$
Se adoptan medidas para garantizar un incremento de la dureza superficial del hormigón, certificable mediante ensayos.	-	-	$\lambda_{46}^V = 30$
El Plan de Mantenimiento de la estructura incluye indicaciones relativas a la vida esperada de las protecciones superficiales y sus intervalos de renovación.	$\lambda_{47}^V = 10 (**)$	$\lambda_{47}^V = 20$	$\lambda_{47}^V = 20$

(*) Condicionado a la consecución de $\lambda_{31}^V > 40$ según la Tabla T10.24.
(**) Estas puntuaciones son adicionales a las indicadas para no adopción de ninguna medida.

Tabla T10.25.- Aspectos a valorar en el indicador V4 (protección superficial del hormigón) y puntuaciones λ_{4x}^V asociadas.

Se adopta una función de valor creciente y cóncava, que requiera la adopción, bien de una medida importante, bien varias de menor entidad, con objeto de conseguir una puntuación relevante en el caso de ambientes agresivos. Esta curva se refleja en la Figura F10.20, y sus parámetros se incluyen en la Tabla T10.20.

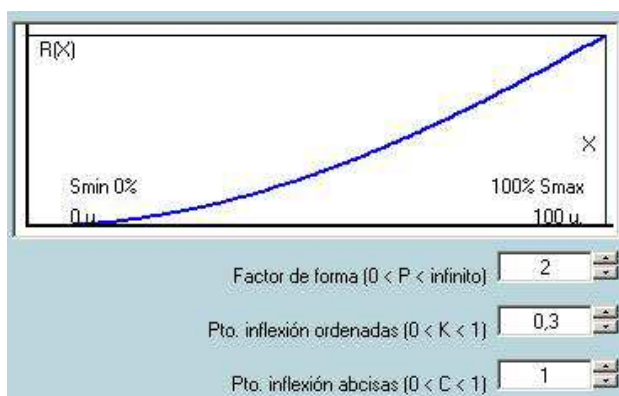


Figura F10.20.- Función de valor para el indicador V4 (protección superficial del hormigón).

10.4.4.3.5. Indicador V5: protección de las armaduras.

Este indicador valora la adopción de sistemas de protección del acero embebido en el hormigón, destinados a retrasar el inicio y el avance de la corrosión. Estas medidas son de aplicación únicamente en casos de gran agresividad ambiental. Para los restantes ambientes se puntúa el máximo posible sin necesidad de ninguna actuación en este sentido, con objeto de no penalizar los casos en que no son necesarias.

Dado que es la patología más habitual a la que se enfrentan las estructuras de hormigón, la corrosión de las armaduras ha sido objeto de muy numerosos estudios y publicaciones. El lector puede consultar, entre otras muchas, las referencias Al-Rabiah et al. (1990), Polder (1996), Alonso et al. (2007), Gjørv (2009), D'Andrea (2010), así como el propio Anejo 9 de la EHE-08, para obtener más información al respecto. Estas fuentes han servido para confeccionar este indicador.

Para luchar contra los efectos de la corrosión existen diferentes técnicas o sistemas, al margen de los indicados en apartados anteriores, relacionados con la mejora de la permeabilidad y de la protección ofrecida por el recubrimiento. La EHE-08 contempla la protección de armaduras mediante revestimientos, el empleo de armaduras de acero inoxidable, los aditivos inhibidores de la corrosión o la protección catódica.

Como se ha advertido, en ambientes en los que el riesgo de corrosión no es especialmente elevado no se encuentra oportuno exigir medidas de protección de este tipo, por lo que se asigna directamente la puntuación máxima. Para ambientes de agresividad moderada también es admisible no proteger de forma directa las armaduras, aunque para obtener la puntuación máxima sí es necesario tomar algún tipo de acción en este sentido. Finalmente, en ambientes extremos sí se considera necesaria la protección de la armadura para poder obtener puntuaciones favorables.

Las armaduras ordinarias de acero al carbono pueden protegerse mediante recubrimiento electroquímico (galvanización) o mediante resinas epoxi, un método todavía poco habitual en España (Vaquero, 2010; El-Hawary y Abdul-Jallel, 2010).

El empleo de armaduras de acero inoxidable es una solución adecuada desde el punto de vista de la durabilidad, dado su muy elevado nivel de protección frente a los ataques por cloruros, aunque su elevado coste hace que este método sea inviable para estructuras ordinarias. En el Capítulo 7 de la referencia Gjørv (2009) se puede encontrar más información al respecto. Una técnica eficiente es emplear armaduras inoxidables únicamente en las zonas más exteriores, críticas o vulnerables de la estructura, ya que se ha comprobado que el contacto eléctrico entre armaduras inoxidables y armaduras de acero al carbono no incrementa el riesgo de corrosión de éstas últimas (Medina et al, 2011). Un aspecto no mencionado en la EHE-08 es el empleo de armaduras no metálicas, como por ejemplo los materiales poliméricos reforzados con fibras (FRP). Podrían ligarse las puntuaciones asociadas a la sustitución de armadura convencional por acero inoxidable o armadura no metálica al porcentaje real de sustitución, sin embargo al no ser técnicas de aplicación habitual parece más indicado incentivar su uso aunque sea sólo en una pequeña porción.

Por su parte, el objetivo principal de los inhibidores de corrosión es la protección del acero. Sin embargo, también pueden afectar a las propiedades del hormigón, y en particular a la resistencia a la

penetración de agua y de cloruros, y a la carbonatación (Söylev y Richardson, 2008; Zheng et al., 2012).

La protección catódica aparece indicada en la bibliografía como el mejor método para mantener bajo control la corrosión inducida por cloruros (Gjorv, 2009). Este sistema tiene costes no despreciables de instalación y mantenimiento. Es aplicable tanto a estructuras nuevas como a otras ya construidas, que comienzan a mostrar signos de deterioro. En ambos casos, para su funcionamiento es imprescindible que exista continuidad eléctrica entre las armaduras, por lo que este punto debería incentivarse; no es una operación compleja o costosa, en comparación a las restantes medidas.

Las medidas de protección recogidas en este indicador son aplicables, en general, al hormigón armado. Como es evidente, no tienen sentido en el hormigón en masa, al carecer de armaduras. En el caso del hormigón pretensado, aunque los efectos de la corrosión pueden ser más peligrosos en armaduras activas (Cobo, 2010), los métodos de protección analizados no resultan generalizables para este tipo de estructuras. Se opta en este caso por asignar la puntuación máxima de este indicador para los elementos con armadura activa, evitando penalizar situaciones en las que no es posible adoptar este tipo de medidas; por otra parte, el empleo de relaciones A/C más bajas y cantidades de cemento más elevadas que en los hormigones armados conduce ya de por sí a hormigones más impermeables y duraderos, con una protección adicional también en este sentido.

Particularizando la fórmula [E10.27] para este caso, se obtiene:

$$P_5^V = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{5xk}^V \quad [E10.33]$$

Siendo p_k el porcentaje de hormigón sometido a cada grupo de clases de exposición y λ_{5x}^V las puntuaciones recogidas en la Tabla T10.26.

Aspectos a valorar	λ^V_{5x}		
	Clase de exposición		
	Agresividad escasa (I, IIb)	Agresividad química moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / cualquiera de las anteriores + Qa, Qb)	Agresividad química elevada (IIIc / cualquier clase general + Qc, F)
No se utiliza ninguna protección especial sobre la armadura.	$\lambda^V_{51} = 100$	$\lambda^V_{51} = 100$ (HM, HP) $\lambda^V_{51} = 70$ (HA)	$\lambda^V_{51} = 100$ (HM, HP) - (HA)
Las armaduras se protegen mediante su galvanizado en caliente.	-	- (HM, HP) $\lambda^V_{52} = 20$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda^V_{52} = 50$ (HA)
Las armaduras se protegen mediante un recubrimiento a base de resina epoxídica.	-	- (HM, HP) $\lambda^V_{53} = 20$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda^V_{53} = 50$ (HA)
Se emplean armaduras de acero inoxidable en las zonas de la estructura más sometidas a posible degradación.	-	- (HM, HP) $\lambda^V_{54} = 20$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda^V_{54} = 70$ (HA)
Se emplean armaduras no metálicas en las zonas de la estructura más sometidas a posible degradación.	-	- (HM, HP) $\lambda^V_{55} = 20$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda^V_{55} = 70$ (HA)
Se emplea un sistema de protección catódica.	-	- (HM, HP) $\lambda^V_{56} = 20$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda^V_{56} = 100$ (HA)
Se asegura, durante la ejecución, la continuidad eléctrica de toda la armadura.	-	- (HM, HP) $\lambda^V_{57} = 10$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda^V_{57} = 40$ (HA)

Tabla T10.26.- Aspectos a valorar en el indicador V5 (protección de las armaduras) y puntuaciones λ^V_{5x} asociadas.

Dado que existe una gran cantidad de aspectos a valorar y no se encuentra una priorización clara entre ellos, se adopta una función de valor lineal y creciente, reflejada en la Figura F10.21, y cuyos parámetros se recogen en la Tabla T10.20.

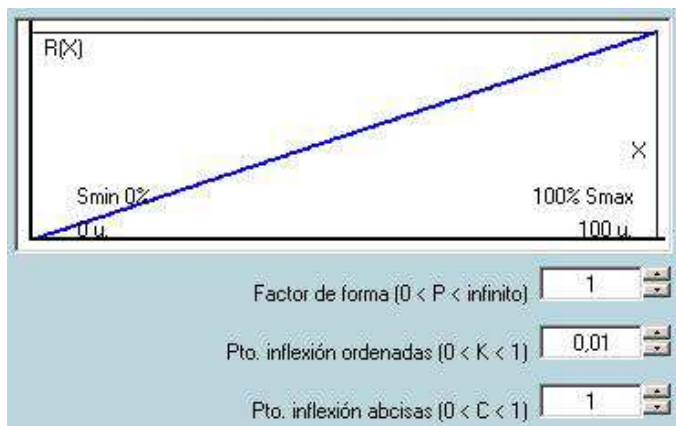


Figura F10.21.- Función de valor para el indicador V5 (protección de las armaduras).

10.4.4.4. Indicador V6: evaluación, mediciones y control de la durabilidad.

El requerimiento de evaluación, mediciones y control de la durabilidad valora, por medio del indicador V6 (que tiene el mismo nombre), la realización de ensayos y mediciones relacionadas con la estimación del estado real de conservación de la estructura y del cálculo aproximado de su vida remanente, con objeto de tomar medidas correctoras en tiempo útil, evitando reparaciones de gran alcance o fallos prematuros.

La EHE-08 no considera de obligada inclusión en el proyecto de la estructura la estimación de su vida útil. Este aspecto no se encuentra dentro de la información mínima que debe contener el proyecto, según indica el Artículo 4. En el Artículo 37 se indica que es opcional la verificación del Estado Límite de Durabilidad (previamente definido en el Artículo 8) mediante el modelo ofrecido por el Anejo 9. Por este motivo parece adecuado valorar positivamente su inclusión en el proyecto, sea cual sea el ambiente de ubicación de la estructura.

Tampoco hace referencia la EHE-08 a la medición o monitorización de las variables relacionadas con la durabilidad, durante la vida útil de la estructura. Osborne (1999), D'Andrea (2010), Fernández (2010) y García et al. (2010; Capítulo 10) tratan estos aspectos. La valoración de la inclusión de sondas o electrodos que permitan la medición continua de parámetros eléctricos o químicos parece conveniente que sea restringida a casos de ambientes extremadamente severos, dado que es una medida muy poco habitual en estructuras ordinarias.

La referencia D'Andrea (2010), está dedicada al desarrollo de indicadores de corrosión que permitan predecir la durabilidad del hormigón. El indicador señalado por esta referencia como el más adecuado a la hora de estudiar la durabilidad de un hormigón es su resistividad eléctrica. Ésta puede emplearse para medir la eficacia del curado, dada su estrecha dependencia con el contenido en humedad del hormigón.

Particularizando la fórmula [E10.27] a este caso, se obtiene:

$$P_6^V = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{6xk}^V \quad [E10.34]$$

Siendo p_k el porcentaje de hormigón sometido a cada grupo de clases de exposición y λ_{6x}^V las puntuaciones recogidas en la Tabla T10.27.

Aspectos a valorar	λ^V_{6x}	
	Clase de exposición	
	Agresividad escasa o moderada (I, IIa, IIb, IIIa, IIIb, IV)	Agresividad elevada (IIIc / cualquier clase específica)
Se incluye en el proyecto un cálculo detallado de la vida útil de la estructura, basado en el Anejo 9 de la EHE-08 o en un modelo de durabilidad análogo.	$\lambda^V_{61}=80$	$\lambda^V_{61}=60$
Se contempla la realización en obra de ensayos (destruyentes o no destruyentes) orientados a evaluar propiedades relacionadas con la durabilidad (porosidad, absorción de agua, permeabilidad de cloruros, resistividad eléctrica, eficacia del curado, resistencia a la abrasión, etc.).	$\lambda^V_{62}=20$	$\lambda^V_{62}=40$ (HM) $\lambda^V_{62}=30$ (HA, HP)
Se especifica en el proyecto un valor límite de resistividad eléctrica para el hormigón.	$\lambda^V_{63}=20$	$\lambda^V_{63}=40$ (HM) $\lambda^V_{63}=30$ (HA, HP)
Se incorporan a la estructura electrodos, sondas u otros elementos que permitan una monitorización de parámetros relacionados con la durabilidad (resistividad, potencial de corrosión, etc.)	-	- (HM) $\lambda^V_{64}=20$ (HA, HP)
Se incluyen en el Plan de Mantenimiento indicaciones relativas a ensayos o medidas a realizar durante la vida útil de la estructura, encaminados a evaluar el estado real y la evolución del posible deterioro de la misma.	$\lambda^V_{65}=20$	$\lambda^V_{65}=20$ (HM) $\lambda^V_{65}=10$ (HA, HP)

Tabla T10.27.- Aspectos a valorar en el indicador V6 (evaluación, mediciones y control de la durabilidad) y puntuaciones λ^V_{6x} asociadas.

La distribución de puntuaciones incentiva que, una vez cumplido el primer requisito de la Tabla T10.27, que es técnicamente sencillo, por tratarse de un aspecto documental del proyecto, el cumplimiento de alguno de los restantes requisitos implique una elevada puntuación. Se pretende así premiar este tipo de medidas que, hasta donde se conoce, son poco habituales en la actualidad. La adopción de una función de valor creciente y con forma de “S” refuerza esta intención. Dicha función se incluye en la Figura F10.21, y sus parámetros se recogen en la Tabla T10.20.

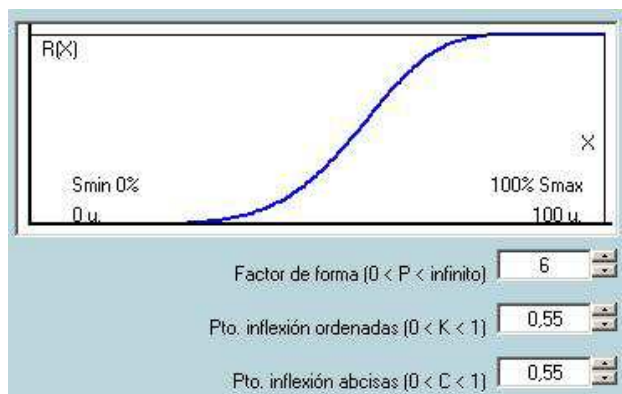


Figura F10.22.- Función de valor para el indicador V6 (evaluación, mediciones y control de la durabilidad).

10.5 ÍNDICE DE SENSIBILIDAD SOCIAL (ISS)

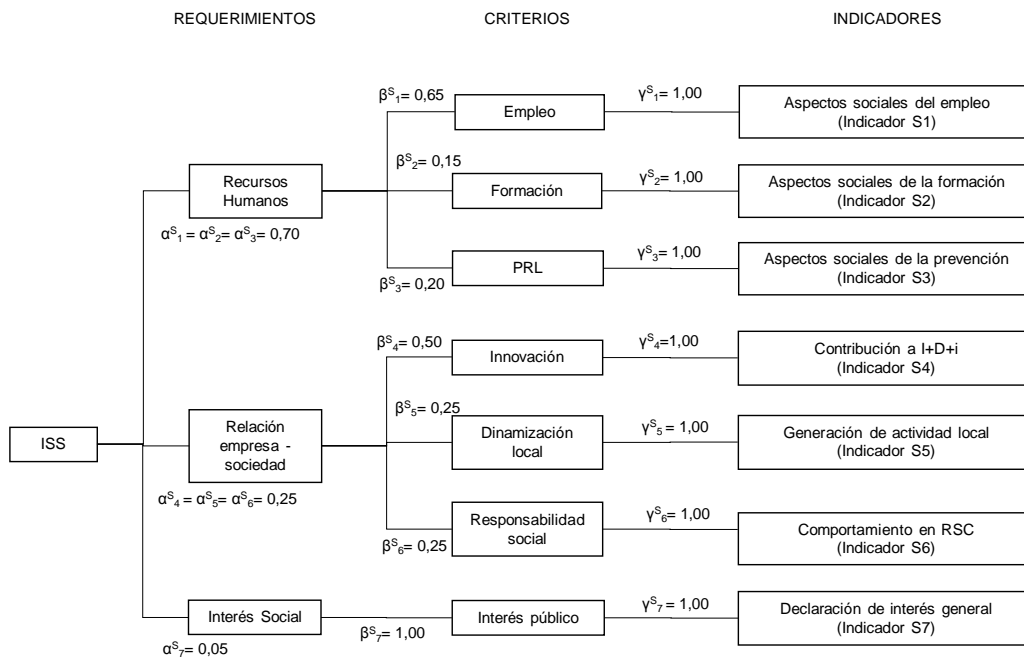


Figura F10.23.- Esquema de cálculo para el Índice de Sensibilidad Social (ISS).

10.5.1. Introducción.

El último elemento necesario para la determinación del ICES es el Índice de Sensibilidad Social (ISS). Tiene por objeto representar la repercusión social de una estructura de hormigón, por medio de un índice cuyo valor oscila entre 0 y 1, de forma análoga a como se han definido el ISMA y el ISE en los epígrafes 10.3 y 10.4, respectivamente.

La evaluación de los aspectos sociales no resulta sencilla, como se ha puesto de manifiesto en la introducción al respecto incluida en el Capítulo 2. Gran parte de la literatura existente enfoca el problema desde un punto de vista orientado a la aplicación, por parte de gobiernos y organizaciones internacionales, de políticas e iniciativas que permitan incentivar el desarrollo y mejorar el nivel de vida en países, regiones o comunidades con carencias en este sentido. En esta Tesis se pretende desarrollar un modelo enfocado a evaluar el impacto social de la construcción de una estructura de hormigón, a través del análisis del comportamiento social de los grupos de interés implicados en la construcción de estructuras de hormigón. En este modelo se tomarán elementos de las diferentes propuestas consultadas en la bibliografía, siempre teniendo en cuenta la particularidad del caso al que se están aplicando.

En el Capítulo 8 (epígrafe 8.4.3) se han identificado los mencionados grupos de interés, que en este caso corresponden principalmente a las diferentes empresas que intervienen en el proceso: fabricantes de cemento, acero y áridos; plantas de hormigón preparado y ferralla; y empresas constructoras y de prefabricados.

En el epígrafe 8.4.4 de dicho capítulo se ha realizado también una estimación del volumen de trabajo generado en cada uno de los anteriores grupos, con objeto de ponderar la relevancia de cada uno de ellos dentro de un índice global. Estableciendo la desigualdad como uno de los grandes problemas sociales a estudiar (Capítulo 2, epígrafe 2.5.4), y el desempleo como factor clave de la misma (Capítulo 8, epígrafe 8.4.2), se considera que la ponderación realizada es bastante representativa de la realidad. Según los resultados del análisis realizado en el Capítulo 8 (epígrafe 8.4.4), corresponde a las empresas constructoras, a las prefabricadoras y a las encargadas de la elaboración de armaduras, una parte muy grande del volumen de mano de obra total. Por el contrario, los fabricantes de componentes y las plantas de hormigón preparado asumen, en este aspecto, un papel mucho más discreto.

Con los antecedentes referidos, se está ya en condiciones de exponer el modelo propuesto para la evaluación de los aspectos sociales. Si bien su esquema de cálculo, representado en la Figura F10.23, comparte la estructura ya vista en el ISMA, es necesario hacer notar que aquí hay una particularidad con respecto a aquel índice, cuya misión es representar adecuadamente la situación expuesta en líneas precedentes: el impacto social de una actividad económica está vinculado al desempeño y al modo de funcionamiento de las empresas que intervienen en ella, y en el caso de las estructuras de hormigón éstas forman parte de siete grupos diferentes. Por tanto, aquí hay un sumatorio ponderado de siete indicadores sociales, agrupados en tres requerimientos.

Una evaluación completa de la parte social debe incluir la valoración individual de cada empresa interviniente, ponderada mediante la contribución de dicha empresa al total, en función de su generación de empleo. Esta característica afectará a los dos primeros requerimientos dedicados, respectivamente, a la política de recursos humanos de la empresa (indicadores S1 a S3), y a la relación empresa-sociedad (indicadores S4 a S6). El tercer requerimiento (indicador S7) valora, de una forma muy simplificada, la implicación de la Administración Pública en la obra, y en este caso tiene carácter global para el conjunto del proyecto evaluado.

El ISS se define como el resultado de aplicar la expresión [E10.35]:

$$ISS = \sum_{j=1}^3 \delta_j \cdot \left(\sum_{i=1}^6 \alpha_i^S \cdot \beta_i^S \cdot \gamma_i^S \cdot V_i^S \right)_j + \left(1 - \frac{M_{pref}}{M_{tot}} \right) \cdot \sum_{j=4}^6 \delta_j \cdot \left(\sum_{i=1}^6 \alpha_i^S \cdot \beta_i^S \cdot \gamma_i^S \cdot V_i^S \right)_j + \left(\frac{M_{pref}}{M_{tot}} \right) \cdot \delta_7 \cdot \left(\sum_{i=1}^6 \alpha_i^S \cdot \beta_i^S \cdot \gamma_i^S \cdot V_i^S \right)_7 + \left(\alpha_7^S \cdot \beta_7^S \cdot \gamma_7^S \cdot V_7^S \right)$$

Donde:

j: subíndice que representa a las diferentes categorías de empresas, según la Tabla T10.28.

i: subíndice que representa a los distintos indicadores que forman parte del ISS (del mismo modo que en las expresiones [E10.3] o [E10.26], correspondientes respectivamente a ISMA e IEVU).

δ_j : coeficiente de ponderación correspondiente al grupo de empresas j.

V_i^S : coeficiente de valor obtenido para el indicador social i.

α_i^S : coeficiente de ponderación del requerimiento correspondiente al indicador social i.

β_i^S : coeficiente de ponderación del criterio correspondiente al indicador social i.

γ_i^S : coeficiente de ponderación del indicador social i.

M_{pref} : peso del conjunto de elementos prefabricados que forman parte de la estructura.

M_{tot} : peso total de la estructura considerada.

Dado que la expresión [E10.35] puede resultar farragosa a primera vista, se detallará a continuación su composición, con objeto de facilitar su comprensión.

El primer sumando, $\sum \delta_j \cdot \left(\sum \alpha_i^S \cdot \beta_i^S \cdot \gamma_i^S \cdot V_i^S \right)$, supone realizar la suma ponderada de los indicadores S1 a S6 (empleo, formación, prevención de riesgos laborales, contribución a la I+D+i, actividad local y responsabilidad social corporativa), para las empresas productoras de cemento (j=1), acero (j=2) y áridos (j=3), y a su vez sumar dichos resultados, ponderados con los coeficientes δ_1 , δ_2 y δ_3 , correspondientes a dichos tres tipos de empresas (cemento, acero y áridos), que son coherentes con la capacidad de creación de empleo, sobre el total de empleo generado con motivo de la construcción de una estructura de hormigón.

En el segundo sumando, $\left(1 - \frac{M_{pref}}{M_{tot}} \right) \cdot \sum \delta_j \cdot \left(\sum \alpha_i^S \cdot \beta_i^S \cdot \gamma_i^S \cdot V_i^S \right)$, se repite la operación anterior para las empresas de hormigón preparado (j=4), de elaboración de armaduras (j=5) y contratistas (j=6), empleando también los correspondientes coeficientes δ_j , y añadiendo un factor adicional que representa el porcentaje de ejecución in situ sobre el total de la obra; este último factor permite que el segundo sumando sólo se aplique a la parte no prefabricada.

El tercer término, $\left(\frac{M_{pref}}{M_{tot}} \right) \cdot \delta_7 \cdot \left(\sum \alpha_i^S \cdot \beta_i^S \cdot \gamma_i^S \cdot V_i^S \right)$, repite de nuevo las operaciones anteriores, para la empresa de prefabricación (j=7), empleando el coeficiente δ_7 , y añadiendo un factor adicional que representa el porcentaje total de la estructura construido mediante elementos prefabricados; este factor adicional permite que el tercer sumando sólo se aplique a la parte prefabricada.

Por último, el cuarto sumando, $\left(\alpha_7^S \cdot \beta_7^S \cdot \gamma_7^S \cdot V_7^S \right)$, constituye la evaluación del indicador S7, que corresponde a la declaración de interés general por la administración pública, y tiene un valor único para el conjunto de la obra.

Los coeficientes δ_j introducen en la ecuación la jerarquización de cada grupo de empresas en base al volumen de mano de obra que genera, de acuerdo con el análisis realizado en el Capítulo 8 (epígrafe 8.4.4); recordemos que la suma de ejecución en obra y elaboración de armaduras, o alternativamente la prefabricación externa, ronda el 80% del trabajo.

Como se ha anticipado, los factores (M_{pref}/M_{tot}) y $(1 - M_{pref}/M_{tot})$ sirven para diferenciar entre la parte de la estructura ejecutada "in situ" y la parte prefabricada. Una planta de prefabricación integra las funciones de las plantas de hormigón preparado y de elaboración de armaduras, al tiempo que minimiza la necesidad de mano de obra in situ. No obstante, es difícil (aunque no fuese imposible) que en la práctica pueda darse un caso en el que el 100% de la estructura sea prefabricada; mientras que la existencia de estructuras con el 100% de sus elementos ejecutados "in situ" sí tiene mayor probabilidad de existir, aunque lo más probable es que habitualmente ambos términos coexistan diferentes proporciones, dependiendo del tipo de obra; así, por ejemplo, en la industrial casi todo es prefabricado, y en la residencial sucede lo contrario.

Los coeficientes de valor V_i^S proceden de aplicar a cada indicador social su función de valor correspondiente, definida genéricamente por la expresión [E10.4] y los parámetros incluidos en la Tabla T10.29. Los parámetros α_i^S , β_i^S y γ_i^S se han definido, como en los casos de los índices ambiental y económico, de acuerdo con la relevancia estimada para cada requerimiento, criterio e indicador en el esquema global del ISS, y sus valores se recogen en la Tabla T10.30.

En este sentido, se ha optado por otorgar una importancia muy elevada al requerimiento relativo a los recursos humanos ($\alpha^S = 0,70$) frente a la relación de la empresa con la sociedad ($\alpha^S = 0,25$) y a la declaración de interés general ($\alpha^S = 0,05$). Esta elección se debe al gran impacto que supone actualmente la generación de empleo en la sociedad española, afectada de altos índices de desempleo, de un crecimiento continuo de la desigualdad y de la disminución de las denominadas “clases medias”. Más detalladamente, hay que decir que el primer requerimiento incluye la generación de empleo que, por lo ya dicho, hoy en día es el aspecto más importante; por otro lado, la contribución de la empresa al avance de la ciencia y la técnica, así como a la actividad local y a la reducción de desigualdades (segundo requerimiento) son mucho más importantes que una mera declaración de interés general.

Grupo	Coficiente	Valor
Fabricantes de cemento (j=1)	$\bar{\delta}_1$	0,07
Fabricantes de acero (j=2)	$\bar{\delta}_2$	0,07
Canteras (j=3)	$\bar{\delta}_3$	0,07
Plantas de hormigón preparado (j=4)	$\bar{\delta}_4$	0,07
Plantas de ferralla (j=5)	$\bar{\delta}_5$	0,36
Empresas constructoras (j=6)	$\bar{\delta}_6$	0,36
Plantas de prefabricación (j=7)	$\bar{\delta}_7$	0,79

Tabla T10.28.- Coeficientes $\bar{\delta}_j$ para el cálculo del ISS.

Indicador	Parámetro				Geometría de la función	
	K_i	m_i	n_i	A_i	Pendiente	Curvatura (*)
Aspectos sociales del empleo (S1)	1,67	0,30	0,80	5,00	Creciente	Cóncava
Aspectos sociales de la formación (S2)	10,50	0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Aspectos sociales de la prevención (S3)	10,50	0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Contribución a I+D+i (S4)	1,44	0,65	0,30	0,50	Creciente	Convexa
Generación de actividad local (S5)	10,50	0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Comportamiento en RSC (S6)	1,44	0,65	0,30	0,50	Creciente	Convexa
Declaración de interés general (S7)	10,50	0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal

Tabla T10.29.- Parámetros para las funciones de valor V_i^S del ISS.

(*) La curvatura de las funciones de valor se entiende referida al eje de ordenadas.

Coeficiente de ponderación	Valor	Coeficiente de ponderación	Valor
$\alpha^S_1, \alpha^S_2, \alpha^S_3$	0,70	β^S_4	0,30
$\alpha^S_4, \alpha^S_5, \alpha^S_6$	0,25	β^S_5	0,50
α^S_7	0,05	β^S_6	0,20
β^S_1	0,65	β^S_7	1,00
β^S_2	0,15	$\gamma^S_1, \gamma^S_2, \gamma^S_3, \gamma^S_4, \gamma^S_5, \gamma^S_6, \gamma^S_7$	1,00
β^S_3	0,20		

Tabla T10.30.- Coeficientes de ponderación para el cálculo del ISS.

En un mismo proceso es posible la participación simultánea de varias empresas de un mismo tipo. Esta es el caso, por ejemplo, de la adquisición hormigón preparado a varios productores diferentes. En este caso es necesario calcular por separado las puntuaciones parciales de cada empresa y obtener la puntuación total por medio del sumatorio de dichas puntuaciones, ponderadas según el porcentaje de material o de volumen de trabajo correspondiente a cada empresa.

La función representativa de un indicador genérico tendría la forma

$$P^S_i = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda^S_{ixk} \quad [E10.36]$$

Donde:

P^S_i : función representativa de cada indicador, que se utiliza como argumento de la función de valor de dicho indicador, entrando en el eje de abscisas.

p_k : porcentaje de suministro de material, o bien volumen de trabajo correspondiente a la empresa k, sobre el total de cada proceso.

λ^S_{ixk} : suma de las puntuaciones parciales para la empresa k.

En todos los casos, puntuación máxima alcanzable para cada indicador, $\sum \lambda^S_{ix}$, es:

$$\sum \lambda^S_{ix} \leq 100 \quad [E10.37]$$

10.5.2. Requerimiento “recursos humanos”.

10.5.2.1. Introducción.

Dentro de este requerimiento, que consta de un único criterio y tres indicadores (S1, S2 y S3), se analiza la dimensión interna de la empresa, en cuanto a la relación de ésta con sus empleados. En las tablas de asignación de puntuaciones de los tres indicadores (tablas T10.31 a T10.33) se alude a la empresa como sujeto de las acciones a valorar. Tal y como se ha expuesto en el epígrafe 10.5.1, dicha empresa será, sucesivamente, la correspondiente al índice j (Tabla T10.29) de cada sumando de la ecuación [E10.35].

Se ha insistido ya en la importancia de la generación de empleo en el contexto económico actual, lo que motiva la asignación del papel principal a este requerimiento, con una ponderación $\alpha^S = 0,70$. El indicador S1 está relacionado precisamente con el empleo; en él no se valora la generación neta de empleo, ya que esto es algo que depende de múltiples circunstancias difíciles de estimar y sobre las cuales no hay, hoy en día, publicaciones claras ni bases de datos completas que permitan realizar estimaciones mínimamente realistas del empleo generado en cada proceso de los contemplados en esta Tesis. La generación de empleo se evalúa de una forma aproximada mediante los coeficientes δ_j , ya comentados, que son coherentes con la capacidad de creación de empleo de cada tipo de empresa, sobre el total de empleo generado con motivo de la construcción de una estructura de hormigón. Por ello, lo que se valora en el indicador S1 es la calidad del empleo generado.

Nuevamente, es este indicador el que recibe la ponderación más importante ($\beta^S = 0,65$) frente a los dos restantes, que evalúan la formación de los trabajadores ($\beta^S = 0,15$) y la política de prevención de riesgos laborales (PRL) de la empresa ($\beta^S = 0,20$). La razón del mayor peso de S1 es obvia, dada la calidad actual del empleo en España. Por su parte, se ha considerado que el peso de S2 (formación) y S3 (PRL) debía ser similar, ya que ambas cosas influyen mucho en la persona, una para mejorar su perfil y trayectoria profesional, mejorando su eficiencia, eficacia, autoestima y calidad futura de empleo, y la otra preservando su integridad y su vida ante posibles accidentes. La razón de que el indicador de PRL tenga menos peso que el de calidad del empleo se debe a que hay una mayor preocupación social con respecto al riesgo laboral, sobre todo si se trata de fallecimientos, que con respecto a la calidad del empleo; además, hay gran cantidad de legislación de PRL, que condiciona mucho los procesos de fabricación, transporte y ejecución, mientras que apenas hay estrategias de mejora de la calidad del empleo. A su vez, se ha dado un poco más de importancia S3 (PRL) frente a S2 (formación), debido al carácter fatal que puede tener.

10.5.2.2. Indicador S1: aspectos sociales del empleo.

Como se ha anticipado, se valora aquí la calidad del empleo generado. Se considera que el aspecto de mayor importancia es su temporalidad, asignando la puntuación más elevada cuando el porcentaje de trabajadores de la empresa con contrato de trabajo temporal es inferior al 25%. La puntuación asignada es nula si dicho porcentaje supera el 75%, y entre ambos límites corresponde a una función lineal. El porcentaje de empleo femenino es la siguiente variable en importancia, asignando la puntuación máxima a partir de un porcentaje paritario hombres-mujeres. Se mantiene esta puntuación cuando el porcentaje supera el 50%, debido a que se pretende premiar la incorporación de la mujer a actividades profesionales tradicionalmente consideradas como masculinas; parece lógico pensar en que la cosa debería ser a la inversa en actividades tradicionalmente consideradas como femeninas, circunstancia que aquí no se da. El apoyo a la inserción de personas en riesgo de exclusión, la retribución complementaria en forma de beneficios sociales y las medidas de conciliación de la vida familiar y laboral son los restantes aspectos evaluados.

Particularizando la ecuación [E10.36] a este caso, se obtiene:

$$P^S_1 = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda^S_{1xk} \quad [E10.38]$$

Recordemos que es posible la coexistencia de diferentes empresas dentro de un mismo grupo j , de modo que debe evaluarse cada una de ellas mediante la expresión anterior y la Tabla T10.31. La puntuación total del indicador corresponde a la suma de las puntuaciones parciales de cada empresa,

ponderada por los porcentajes de participación de las mismas sobre el total de la estructura. Por ejemplo, si hay varias canteras diferentes suministrando áridos, habrá que determinar la puntuación de cada cantera y ponderarla con el porcentaje de árido que suministra, sobre el total de agregado empleado.

Aspecto a valorar	λ^S_{1x}
Porcentaje de empleo temporal acreditado oficialmente por la empresa.	$\lambda^S_{11} = 0$ ($N_{\text{tem}}/N_{\text{tot}} > 0,75$) $\lambda^S_{11} = 60 - (80 \cdot N_{\text{tem}}/N_{\text{tot}})$ ($0,25 \leq N_{\text{tem}}/N_{\text{tot}} \leq 0,75$) $\lambda^S_{11} = 40$ ($N_{\text{tem}}/N_{\text{tot}} < 0,25$)
Porcentaje de empleo femenino acreditado oficialmente por la empresa.	$\lambda^S_{12} = 50 \cdot N_{\text{fem}}/N_{\text{tot}}$ ($N_{\text{fem}}/N_{\text{tot}} \leq 0,50$) $\lambda^S_{12} = 25$ ($N_{\text{fem}}/N_{\text{tot}} > 0,50$)
La empresa acredita oficialmente su participación en programas de inclusión laboral de discapacitados, desempleados de larga duración, o víctimas de violencia doméstica, entre otras posibles acciones de incorporación de trabajadores con riesgo de exclusión social.	$\lambda^S_{13} = 15$
La empresa acredita oficialmente la retribución adicional a sus empleados por medios de beneficios sociales (vales de comida, guardería, seguros médicos, entre otras medidas de ayuda).	$\lambda^S_{14} = 10$
La empresa acredita oficialmente la implantación de medidas de conciliación de la vida laboral y familiar para sus empleados (flexibilidad de horarios, limitación real de duración de la jornada, entre otras medidas de ayuda).	$\lambda^S_{15} = 10$

Tabla T10.31.- Aspectos a valorar en el indicador S1 (aspectos sociales del empleo) y puntuaciones λ^S_{1x} asociadas.

En la Tabla T10.31, son:

N_{tem} : Número de personas con contrato temporal.

N_{fem} : Número de trabajadoras.

N_{tot} : Número total de personas contratadas.

Es importante destacar que los aspectos recogidos en dicha tabla deben estar acreditados por medio de las oportunas documentaciones oficiales o, si ha lugar, por entidades independientes, públicas o privadas, de reconocido prestigio y rigor, con atribuciones para ello.

Debido a la elevada importancia de este indicador a nivel social, se toma una función de valor muy exigente, creciente y cóncava, en la que es necesario un nivel de cumplimiento elevado para obtener puntuaciones aceptables. Dicha función se incluye en la Figura F10.24, y sus parámetros se recogen en la Tabla T10.29.

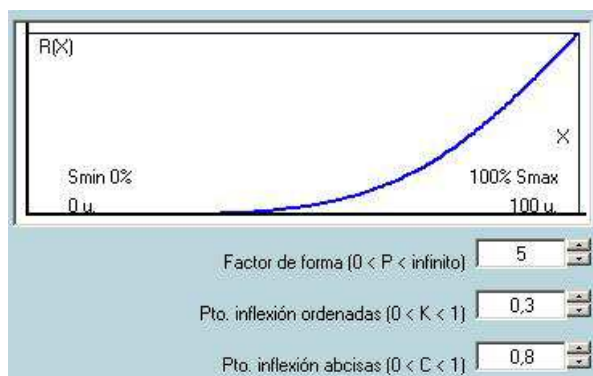


Figura F10.24.- Función de valor para el indicador S1 (aspectos sociales del empleo).

10.5.2.3. Indicador S2: aspectos sociales de la formación.

Este indicador pretende tener en cuenta la importancia de fomentar el trabajo cualificado, así como el esfuerzo realizado por las empresas en la formación continua de sus trabajadores.

El concepto intuitivo de “empleo cualificado” se traslada a la evaluación por medio del porcentaje de trabajadores de cada empresa que cuenta con un nivel mínimo de estudios correspondientes a formación profesional. Se especifica que, para considerar efectivamente el nivel de formación de los empleados, éstos deben estar contratados para realizar funciones acordes a su formación, y dados de alta como tales. Por tanto, por un lado, esto supone tener en cuenta una tendencia actual, que podríamos llamar de “sobrecualificación”, por la cual muchos trabajadores se contratan para realizar funciones muy por debajo de su nivel de formación profesional o universitaria. Por otro, también tiene en cuenta otra tendencia actual, por la cual se contrata a un trabajador para realizar tareas acordes a su formación, dándole de alta como trabajador de menor cualificación. El objeto del indicador es premiar a las empresas más cualificadas, considerando que, por un lado, obtienen una ventaja competitiva frente a otras empresas y, por otro, realizan una contribución social aumentando la formación de su personal.

El segundo aspecto a valorar, en igual orden de importancia que el anterior, es la formación continua de los trabajadores por medio de cursos y acciones formativas, en asuntos relacionados con su trabajo y con el proceso o producto implicado en la estructura de hormigón, bien sean de carácter técnico, de calidad, prevención de riesgos o medio ambiente.

En ambos aspectos se emplean funciones lineales para la asignación de puntuaciones, considerando en el primero de ellos un umbral mínimo del 10% de empleo cualificado, límite por debajo del cual no se puntúa, y un máximo del 50%, a partir del cual se asigna la puntuación máxima. En la valoración de la formación continua se establece como valor frontera 15 horas de formación por persona y año, por debajo de las cuales la asignación es proporcional, mientras que a partir de ellas se obtiene la puntuación máxima.

Particularizando la ecuación [E10.36] a este caso, se obtiene:

$$P_2^S = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{2xk}^S \quad [E10.39]$$

De nuevo, es posible la coexistencia de diferentes empresas dentro de un mismo grupo j. Por tanto, cada empresa se evalúa mediante la expresión anterior y la Tabla T10.32, y la puntuación total del indicador corresponde a la suma de las puntuaciones parciales de cada empresa, ponderada por los porcentajes de participación de las mismas sobre el total de la estructura.

Aspecto a valorar	λ^S_{2x}
Porcentaje de empleo cualificado (trabajadores con nivel de estudios de formación profesional o superior) acreditado oficialmente por la empresa.	$\lambda^S_{21} = 0 \quad (N_c/N_{tot} \leq 0,10)$ $\lambda^S_{21} = 125 \cdot (N_c/N_{tot}) - 12,5 \quad (0,10 < N_c/N_{tot} \leq 0,50)$ $\lambda^S_{21} = 50 \quad (N_c/N_{tot} > 0,50)$
Programa formativo para empleados por la empresa, acreditado oficialmente, en aspectos técnicos, de calidad, PRL o medio ambiente, relacionados con la actividad de la empresa.	$\lambda^S_{22} = 3,33 \cdot N_{hf} \quad (N_{hf} \leq 15)$ $\lambda^S_{22} = 50 \quad (N_{hf} > 15)$

Tabla T10.32.- Aspectos a valorar en el indicador S2 (aspectos sociales de la formación) y puntuaciones λ^S_{2x} asociadas.

En la Tabla T10.32, son:

N_c : Número de trabajadores cualificados, entendiéndose como tales aquellos que cuentan con estudios de formación profesional o nivel superior, y ejercen su actividad profesional en la empresa en base a ello, estando dados de alta de forma acorde a su titulación.

N_{tot} : Número total de trabajadores.

N_{hf} : Número horas de formación por trabajador y año.

De nuevo, los aspectos recogidos en dicha tabla deben estar acreditados por medio de las oportunas documentaciones oficiales o, si ha lugar, por entidades independientes, públicas o privadas, de reconocido prestigio y rigor, con atribuciones para ello.

En ausencia de motivos que lleven a la elección de otra geometría, se adopta una función de valor lineal y creciente, incluido en la Figura F10.25, cuyos parámetros se recogen en la Tabla T10.29.

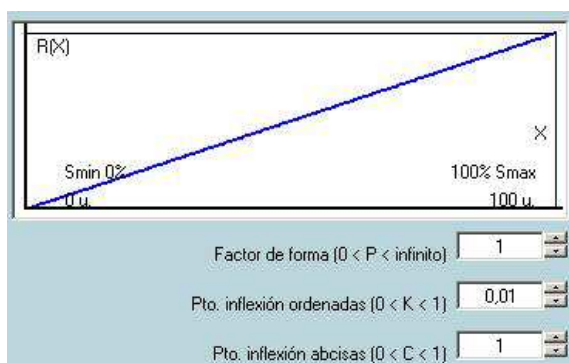


Figura F10.25.- Función de valor para el indicador S2 (aspectos sociales de la formación).

10.5.2.4. Indicador S3: aspectos sociales de la prevención.

La prevención de riesgos laborales es un campo fuertemente legislado y en el que coexisten normativas de diferente rango y alcance, en ocasiones solapando parte de sus prescripciones. En España, la norma básica en este aspecto es la Ley 31/1995 de prevención de riesgos laborales (Jefatura del Estado, 1995), de la que manan múltiples disposiciones derivadas que particularizan o concretan los principios generales de la misma a cada aspecto o sector de actividad. Entre toda esa legislación derivada, puede citarse el Reglamento de los Servicios de Prevención (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 1997), que determina en gran parte la organización de la prevención en la empresa, y el RD 1627/1997 (Ministerio de la Presidencia, 1997), que establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.

Adicionalmente, múltiples disposiciones serían de aplicación al conjunto de procesos considerados en este índice, en función de la actividad considerada (fabricación de componentes, preparación de hormigón, ejecución en obra, prefabricación, etc.). Entre ellas estarían las relacionadas con la seguridad industrial (seguridad en máquinas, aparatos a presión, riesgos eléctricos, almacenamiento de productos químicos, ruido, entre otros) o con la ejecución de trabajos en obra (manejo de cargas, realización de trabajos en altura, seguridad vial, señalización, por ejemplo). Como se ha indicado en el Capítulo 9, el alto grado de estudio y normalización que ha alcanzado la prevención hace que no sea sencillo evaluar la posibilidad de adoptar medidas de seguridad adicionales a las estipuladas legalmente, como se recoge en el Anejo 13 de la EHE-08. Dichas “medidas adicionales” podrían bien carecer de sentido, o bien resultar de difícil implantación, o ser incluso contraproducentes, en algún caso.

Para introducir en el ISS un indicador relativo a la prevención se valora, por un lado, la certificación de los sistemas de gestión de PRL, de forma similar a lo establecido para los sistemas de gestión medioambiental en la evaluación del ISMA. Por otro, se tiene en cuenta que las estadísticas de control de accidentes de la empresa muestren un comportamiento mejor que la media de su sector.

Los sistemas de gestión de prevención de riesgos laborales son susceptibles de organizarse y certificarse de acuerdo a normas voluntarias internacionales, de un modo similar a los sistemas de gestión de calidad o de gestión medioambiental. La norma más habitual para la certificación de sistemas de gestión de PRL es la OSHAS 18001 (AENOR, 2007).

Los índices estadísticos permiten expresar en cifras relativas las características de accidentabilidad de una empresa, de un modo útil a efectos comparativos. La Nota Técnica de Prevención nº1 del Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo (Bestratén y Turmo, 1982) define varios de estos indicadores: índices de frecuencia, incidencia, gravedad y duración media. Dado que en este estudio el interés radica en poder establecer comparaciones entre el comportamiento de las empresas evaluadas y la media del sector, se toma como referencia el Índice de Incidencia (II). El II aparece reflejado en la Estadística de Accidentes de Trabajo editada anualmente por el Ministerio de Empleo y Seguridad Social (2015). Bestratén y Turmo (1982), definen dicho índice como el número de accidentes ocurridos por cada mil personas expuestas, según la expresión siguiente:

$$\text{Índice de Incidencia} = (\text{Número accidentes} / \text{Número de trabajadores}) \times 1000 \quad [\text{E10.40}].$$

El indicador S3 premia la desviación favorable de la empresa con respecto al índice medio de su sector en la última estadística disponible; es decir, que la incidencia sea menor a la de la media. La puntuación es proporcional a dicha disminución, alcanzándose la puntuación máxima a partir de una disminución mayor o igual al 50%.

Particularizando la fórmula [E10.36] a este caso, se obtiene:

$$P^S_3 = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda^S_{3xk} \quad [E10.41]$$

Al igual que en los indicadores anteriores, es posible la coexistencia de diferentes empresas dentro de un mismo grupo j, y cada empresa se evalúa mediante dicha expresión, con los valores de la Tabla T10.33. La puntuación total del indicador corresponde a la suma de las puntuaciones parciales de cada empresa, ponderada por los porcentajes de participación de las mismas sobre el total de la estructura.

Aspecto a valorar	λ^S_{3x}
La empresa dispone de una certificación oficial voluntaria de su sistema de gestión de la prevención de riesgos laborales.	$\lambda^S_{31} = 35$
El índice de incidencia de accidentes laborales de la empresa en el último año está por debajo de la media de su sector, según las estadísticas oficiales.	$\lambda^S_{32} = 0 \quad (0 \leq [(I_{\text{medio}} - I_{\text{emp}}) / I_{\text{emp}}])$ $\lambda^S_{32} = 130 \cdot [(I_{\text{medio}} - I_{\text{emp}}) / I_{\text{emp}}] \quad (0 < [(I_{\text{medio}} - I_{\text{emp}}) / I_{\text{emp}}] < 0,50)$ $\lambda^S_{32} = 65 \quad ([(I_{\text{medio}} - I_{\text{emp}}) / I_{\text{emp}}] \geq 0,50)$

Tabla T10.33.- Aspectos a valorar en el indicador S3 (aspectos sociales de la prevención) y puntuaciones λ^S_{3x} asociadas.

En la Tabla T10.33, son:

I_{medio} : Índice de Incidencia medio correspondiente al sector considerado, correspondiente al último dato publicado oficialmente.

I_{emp} : Índice de Incidencia de la empresa, correspondiente al último año.

De nuevo, los aspectos recogidos en dicha tabla deben estar acreditados por medio de las oportunas documentaciones oficiales o, si ha lugar, por entidades independientes, públicas o privadas, de reconocido prestigio y rigor, con atribuciones para ello.

Al igual que en el indicador anterior, por las mismas razones, se utiliza una función de valor de tipo lineal y creciente. Dicha función se incluye en la Figura F10.26, y sus parámetros se recogen en la Tabla T10.29.

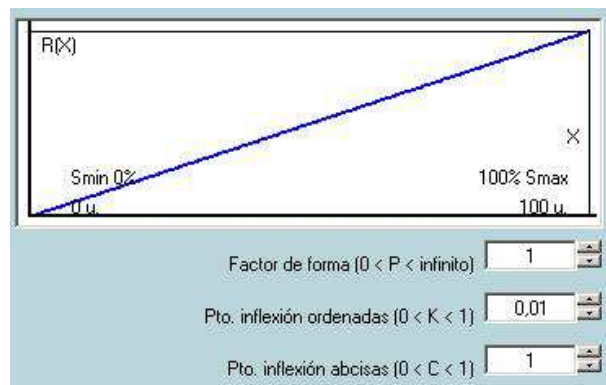


Figura F10.26.- Función de valor para el indicador S3 (aspectos sociales de la prevención).

10.5.3. Requerimiento “relación de la empresa con la sociedad”

10.5.3.1. Introducción.

Este segundo requerimiento del ISS profundiza en lo que la literatura existente denomina “dimensión externa” de la empresa (Labuschagne y Brent, 2006); dicho de otro modo, en los impactos positivos que las actividades de una empresa pueden tener sobre la sociedad en cuyo seno trabaja, al margen de los que puedan ser estrictamente inherentes a su actividad. La ponderación de este requerimiento sobre el total del ISS ($\alpha^S = 0,25$) se coloca por detrás de la otorgada a la política de recursos humanos, y por encima de la posible declaración de interés general de la obra. Este requerimiento se desglosa en tres criterios, cada uno de ellos correspondiente a un indicador social (indicadores S4 a S6). Al igual que en el caso anterior, dichos indicadores deben ser evaluados para cada grupo de empresas intervinientes en la obra.

El primero de los indicadores (S4) valora el apoyo de la empresa a la investigación, como herramienta fundamental no sólo para su desarrollo sino para el del conjunto de la sociedad y de la economía del país. Considerando que la investigación, el desarrollo y la innovación están entre los aspectos más importantes a considerar en el diseño de políticas públicas, y que son herramientas que sirven, entre otras cosas, para paliar o disminuir problemas sociales como la falta de empleo o las desigualdades, cabe asignar a este indicador un peso preponderante dentro de este requerimiento, alcanzando el 50% del total ($\beta^S = 0,50$).

La mitad restante de la puntuación de este requerimiento se divide, a partes iguales, entre la dinamización económica que genera una empresa en su entorno más próximo (indicador S5, $\beta^S = 0,25$) y la actitud de la empresa en cuanto a Responsabilidad Social Corporativa (RSC, indicador S6, $\beta^S = 0,25$). Ambos aspectos contemplan impactos positivos derivados de las actividades empresariales, si bien parece lógico suponer que su relevancia a largo plazo puede ser menor que la que resultaría de incrementar el esfuerzo en investigación y desarrollo. De esta forma, en el modelo planteado se incentiva más la implicación de la empresa en programas estructurados y organizados por entidades públicas, vinculados a estrategias a medio o largo plazo.

10.5.3.1. Indicador S4: contribución a la I+D+i.

La participación de la empresa en proyectos de investigación y transferencia tecnológica era un aspecto ya abordado por el Anejo 13 de la EHE-08. En este caso se valora, por un lado, la participación o colaboración en este tipo de proyectos, y por otro la incorporación de resultados o desarrollos de los mismos a las actividades de la empresa, siempre que estén relacionadas con la construcción de estructuras de hormigón o con los procesos implicados en ello.

Particularizando la ecuación [E10.36] para este caso, se obtiene:

$$P_4^S = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{4xk}^S \quad [E10.42]$$

De nuevo, ante la participación de más de una empresa dentro de un mismo grupo j, y cada empresa se evaluará mediante dicha expresión, con los valores de la Tabla T10.34. La puntuación total del indicador corresponde a la suma de las puntuaciones parciales de cada empresa, ponderada por los porcentajes de participación de las mismas sobre el total de la estructura.

Aspecto a valorar	λ_{4x}^S
La empresa acredita oficialmente su participación en proyectos de I+D+i con financiación pública o reconocimiento oficial, en los tres últimos años.	$\lambda_{41}^S = 15$ (participación en un proyecto de investigación) $\lambda_{41}^S = 30$ (participación en 2 ó 3 proyectos de investigación) $\lambda_{41}^S = 50$ (participación más de 3 proyectos de investigación)
La empresa acredita oficialmente la incorporación de resultados de dichos proyectos a sus actividades relacionadas con la obra, o bien de proyectos en los cuales no ha participado.	$\lambda_{42}^S = 30$ (incorporación de resultados de proyectos en los que la empresa no ha participado) $\lambda_{42}^S = 50$ (incorporación de resultados de proyectos en los que ha participado la empresa)

Tabla T10.34.- Aspectos a valorar en el indicador S4 (contribución a la I+D+i) y puntuaciones λ_{4x}^S asociadas.

Una vez más, los aspectos recogidos en dicha tabla deben estar acreditados por medio de las oportunas documentaciones oficiales o, si ha lugar, por entidades independientes, públicas o privadas, de reconocido prestigio y rigor, con atribuciones para ello.

Los aspectos valorados en este indicador pueden no estar excesivamente extendidos entre el tejido empresarial español, por lo que se considera prioritario incentivar su cumplimiento, aunque de una manera reducida. Para ello se emplea una función de valor creciente y convexa. Dicha función se incluye en la Figura F10.27, y sus parámetros se recogen en la Tabla T10.29.

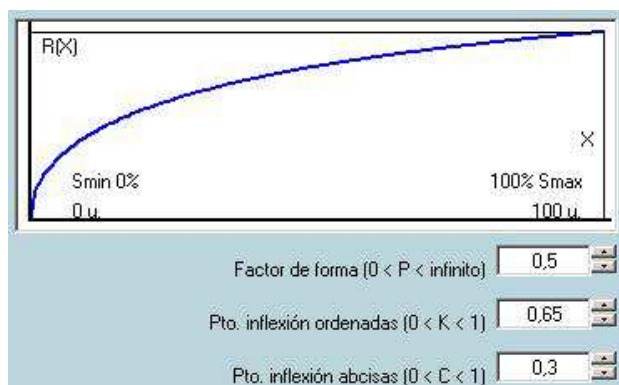


Figura F10.27.- Función de valor para el indicador S4 (contribución a la I+D+i).

10.5.3.3. Indicador S5: generación de actividad local.

El indicador S5 se ha enfocado a valorar las consecuencias positivas de la actividad de una empresa sobre su entorno inmediato, en el sentido de dinamizar la actividad económica local, entendiendo como local no exclusivamente el entorno de la obra o proyecto analizado, sino el correspondiente a la ubicación de cada una de las empresas que concurren o intervienen en la construcción de la estructura.

Al margen de la consideración anterior, el término “local” debe de ser también matizado, no tomándolo como sinónimo de “municipal” sino haciéndolo extensivo a una zona geográfica más amplia. Se ha optado por diferenciar entre tres niveles de proximidad: provincial o de provincia limítrofe, nacional o internacional. El nivel provincial o limítrofe es el que se identifica como “local” y al que se asignan las puntuaciones más elevadas, mientras que al nivel nacional corresponde una puntuación más baja. Al nivel internacional se asigna una puntuación nula.

Los principales aspectos a valorar son la procedencia, encuadrada en los tres ámbitos geográficos anteriores, de los materiales o suministros necesarios para la estructura, y de los servicios requeridos para la producción de la misma o de sus componentes.

En el caso de los materiales o suministros, puede señalarse que la evaluación de varios de ellos puede ir “en cascada”, siguiendo los escalones de la cadena de valor del producto. A modo de ejemplo, el primer eslabón a evaluar será la producción de cemento ($j=1$). En este caso, el indicador valorará positivamente que la planta cementera adquiera sus materias primas en su entorno; algo que, por otra parte, suele ser habitual. Posteriormente, en la evaluación de la producción de hormigón en planta ($j=4$), entrará en juego el origen del cemento, valorando en este caso su procedencia con respecto a la planta de hormigón, donde ya se pueden encontrar mayores distancias de transporte que en el caso anterior.

En cuanto a la procedencia de la mano de obra, la evaluación se enfoca hacia la subcontratación de empresas locales para la prestación de servicios o realización de trabajos y obras, ya que se entiende que la plantilla habitual de una empresa vive en las cercanías de la misma.

En ambos casos se trata de premiar la consolidación de entramados empresariales sólidos en los entornos de las empresas participantes en el proyecto, entendiendo que esta circunstancia favorece el desarrollo económico y social de las regiones. Se castiga la importación de materiales o la

subcontratación de empresas extranjeras, entendiéndose que alejan las sinergias de la actividad empresarial de quienes sí sufren sus consecuencias negativas.

Este indicador social resulta paralelo al indicador ambiental M8, relacionado con el impacto de los procesos de transporte. En ambos se incentiva el empleo de recursos lo más próximos que sea posible. La asignación de puntuaciones es proporcional a los porcentajes de materiales o servicios que proceden de cada ámbito geográfico.

Un tercer aspecto a valorar se refiere a los materiales o suministros procedentes del exterior de la Unión Europea, que no acrediten un origen responsable, por medio de un certificado oficialmente reconocido. La razón de ello es la incertidumbre que puede existir ante el “perfil social” de productos procedentes de regiones con legislación laboral, industrial, medioambiental o de seguridad, muy diferentes a la nuestra; en particular, en el caso de países en vías de desarrollo. Ya se han abordado en el Capítulo 2 algunos aspectos citados habitualmente por la literatura existente en materia de sostenibilidad social, como son la existencia de trabajo infantil o forzado, el respeto a los derechos humanos, o la discriminación de minorías, entre otros.

Para poder asegurar que un producto proveniente del mercado exterior (sea, por ejemplo, clinker para la fabricación de cemento, procedente de una planta asiática e importado a España por vía marítima) cumple con un mínimo de dichos requisitos, se precisaría un certificado al respecto emitido por un organismo o entidad reconocidos oficialmente. Esta idea, plasmada aquí como un intento de promover su difusión, no es sencilla, a pesar de que existen iniciativas de este tipo en otros sectores como la madera, con certificaciones como FSC o PEFC. En todo caso, se le asigna una puntuación testimonial, siguiendo una de las ideas clave de la sostenibilidad: piensa globalmente, y consume localmente.

Particularizando la ecuación [E10.36] a este caso, se obtiene:

$$P^S_5 = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda^S_{5xk} \quad [E10.43]$$

Como en el resto de indicadores sociales anteriores, la participación de más de una empresa dentro de un mismo grupo j lleva a la necesidad de evaluar a cada empresa mediante dicha expresión, con los valores de la Tabla T10.35, y la puntuación total del indicador será la suma de las puntuaciones parciales de cada empresa, ponderada con los porcentajes de participación de las mismas sobre el total de la estructura.

Aspecto a valorar	λ^S_{5x}
Procedencia de las materias primas o suministros consumidos por la empresa.	$\lambda^S_{51} = (50 \cdot M_{prov}/M_{tot}) + (20 \cdot M_{nac}/M_{tot})$
Procedencia de los servicios o mano de obra subcontratada por la empresa.	$\lambda^S_{52} = (50 \cdot W_{prov}/W_{tot}) + (20 \cdot W_{nac}/W_{tot})$
En el caso de materias primas o suministros procedentes del exterior de la Unión Europea, la empresa puede acreditar un origen responsable, por medio de un certificado oficialmente reconocido.	$\lambda^S_{53} = 10$

Tabla T10.35.- Aspectos a valorar en el indicador S5 (generación de actividad local) y puntuaciones λ^S_{5x} asociadas.

En la Tabla T10.35, son:

M_{prov} : peso de los materiales o suministros procedentes de la misma provincia que la ubicación de la empresa, o de una provincia limítrofe.

M_{nac} : peso de los materiales o suministros procedentes del resto del territorio nacional.

M_{tot} : peso del total de materiales o suministros adquiridos, comprendiendo la suma de los de origen nacional y de los de procedencia internacional.

W_{prov} : volumen de trabajo subcontratado a empresas procedentes de la misma provincia o de una provincia limítrofe, medido por el importe correspondiente a las partidas subcontratadas a cada empresa, según el presupuesto de ejecución material de la obra; esto se hace para facilitar la tarea del evaluador, puesto que estimar las horas de trabajo reales resulta más complicado y trabajoso.

W_{nac} : volumen de trabajo subcontratado a empresas procedentes del resto del territorio nacional, medido por el importe correspondiente a las partidas subcontratadas a cada empresa, según el presupuesto de ejecución material de la obra.

W_{tot} : volumen total de trabajo subcontratado, incluyendo el correspondiente a empresas nacionales y extranjeras, medido por el importe correspondiente a las partidas subcontratadas, según el presupuesto de ejecución material de la obra.

Por razones análogas a los casos anteriores en que se utiliza este tipo de función, se vuelve a emplear en este indicador una función de valor lineal y creciente, que traslade directamente las puntuaciones obtenidas por aplicación de las expresiones de la tabla T10.35. Dicha función se incluye en la Figura F10.28, y sus parámetros se recogen en la Tabla T10.29.

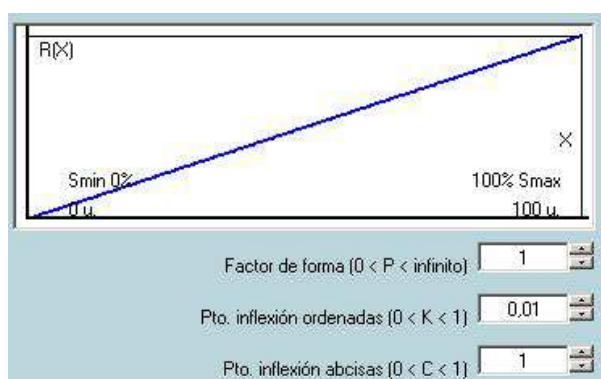


Figura F10.28.- Función de valor para el indicador S5 (generación de actividad local).

10.5.3.4. Indicador S6: Responsabilidad Social Corporativa.

La Responsabilidad Social Corporativa ha sido tratada en el Capítulo 2 (epígrafe 2.5.5) y se incorpora al modelo como el último indicador del presente requerimiento, siendo también el que recibe la menor ponderación ($\beta^S = 0,20$), por razones ya comentadas. Valora la participación de la empresa en programas de reducción de desigualdades sociales, voluntariado con el mismo objetivo, patrocinio de organizaciones que tengan dicha misión, patrocinio o mecenazgo de eventos o programas culturales, artísticas o científicas, entre otros aspectos, así como su política de comunicación y transparencia, aspecto ya contemplado por el Anejo 13 de la EHE-08.

Particularizando la expresión [E10.36] a este caso, se obtiene:

$$P_6^S = (1/100) \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{6xk}^S \quad [E10.44]$$

Como siempre en el caso de indicadores sociales, la participación de más de una empresa dentro de un mismo grupo j lleva a la necesidad de evaluar a cada empresa mediante dicha expresión, con los valores de la Tabla T10.36, y la puntuación total del indicador será la suma de las puntuaciones parciales de cada empresa, ponderada con los porcentajes de participación de las mismas sobre el total de la estructura.

Aspecto a valorar	λ_{6x}^S
La empresa acredita oficialmente, y de manera cuantitativa, su participación en programas de reducción de desigualdades sociales, voluntariado con el mismo objetivo, patrocinio de organizaciones que tengan dicha misión, patrocinio o mecenazgo de eventos o programas culturales, artísticas o científicas, entre otros aspectos.	$\lambda_{61}^S = 70$ si $MP_{RSC-Fact} \geq 0,7 \%$ $\lambda_{61}^S = 50$ si $MP_{RSC-Fact} \geq 0,5 \%$ $\lambda_{61}^S = 30$ si $MP_{RSC-Fact} \geq 0,3 \%$ $\lambda_{61}^S = 10$ si $MP_{RSC-Fact} \geq 0,1 \%$ $\lambda_{61}^S = 0$ si $MP_{RSC-Fact} < 0,1 \%$
La empresa elabora una memoria de Responsabilidad Social Corporativa, informe de Sostenibilidad que incluye aspectos sociales, o informes similares, accesible al público en general.	$\lambda_{62}^S = 15$
La empresa mantiene canales abiertos de comunicación para informar al público en general acerca de sus actividades.	$\lambda_{63}^S = 15$

Tabla T10.36.- Aspectos a valorar en el indicador S6 (Responsabilidad Social Corporativa) y puntuaciones λ_{6x}^S asociadas.

En la Tabla T10.36, $MP_{RSC-Fact}$ es la media del cociente entre el presupuesto anual de RSC y la facturación anual de la empresa (sin IVA), para los últimos 3 años, una vez descontadas posibles contraprestaciones de las organizaciones a las que se ayuda; este sería el caso, por ejemplo, de que esas organizaciones adquiriesen bienes de la empresa donante.

La cifra del $MP_{RSC-Fact} = 0,7\%$, que otorga la máxima puntuación, se corresponde con el objetivo planteado por la ONU en 1972, de destinar el 0,7 % del Producto Nacional Bruto de los países más industrializados a ayuda oficial al desarrollo para los países menos favorecidos; por razones obvias, aquí esa cifra se usa de forma parecida, pero no igual, aplicada a empresas en vez de a países.

Como siempre, los aspectos recogidos en la Tabla T10.36 deben estar acreditados por medio de las oportunas documentaciones oficiales o, si ha lugar, por entidades independientes, públicas o privadas, de reconocido prestigio y rigor, con atribuciones para ello.

Del mismo modo que en el indicador S4, se incentiva el cumplimiento de los compromisos en RSC (aunque sea a un nivel reducido o moderado) por medio de una función de valor creciente y convexa, reflejada en la Figura F10.29, cuyos parámetros se recogen en la Tabla T10.29.

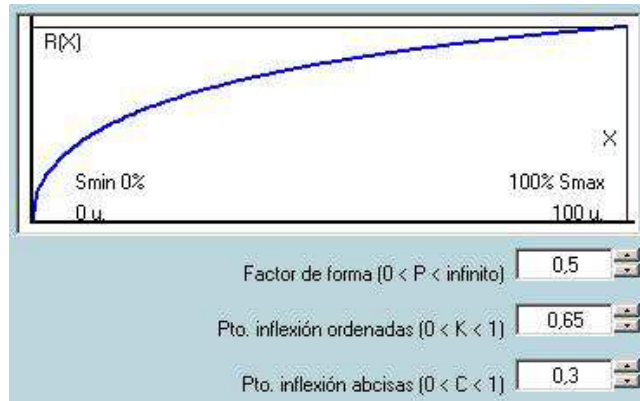


Figura F10.29.- Función de valor para el indicador S6 (Responsabilidad Social Corporativa).

10.5.4. Indicador S7: declaración de interés general.

El requerimiento referido al interés social de la estructura consta de un único indicador, S7, que tiene una ponderación del 5% sobre el total del ISS ($\alpha^S = 0,05$), por razones ya explicadas.

Este indicador valora un único aspecto, ya presente en el Anejo 13 de la EHE-08, que consiste en la declaración de la obra como de interés general por parte de la Administración Pública. Afectando a la totalidad de la obra, no procede en este caso su evaluación parcial por cada empresa participante, como se indicó en el epígrafe 10.5.1 al definir la expresión [E10.35].

Particularizando la expresión [E10.36] a este caso, se obtiene:

$$P^S_7 = (1/100) \cdot \sum \lambda^S_{7x} \quad [E10.44]$$

Que en la práctica puede adoptar únicamente los valores 0 o 100, de acuerdo con la Tabla T10.37.

Aspecto a valorar	λ^S_{7x}
Obra declarada de interés general por la Administración Pública.	$\lambda^S_{71} = 100$

Tabla T10.37.- Aspectos a valorar en el indicador S7 (declaración de interés general) y puntuaciones λ^S_{7x} asociadas.

Una vez más, por no encontrarse razones para emplear otro tipo de función, para este indicador se utiliza una función de valor lineal y creciente, reflejada en la Figura F10.30, cuyos parámetros se recogen en la Tabla T10.29.

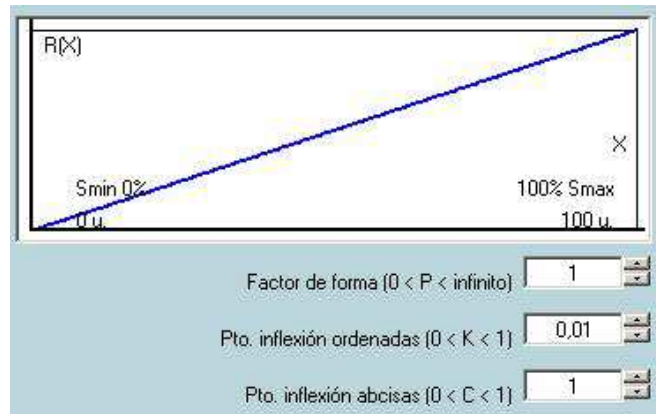


Figura F10.30.- Función de valor para el indicador S7 (declaración de interés general).

10.6. GRUPO DE INDICADORES COMPLEMENTARIOS

Los epígrafes anteriores han definido en profundidad la determinación del Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES), por medio de sus componentes, que representan los aspectos ambientales, económicos y sociales de la sostenibilidad. El ICES es un valor adimensional, comprendido entre 0 y 1, que sirve para situar dentro de una escala comparativa el nivel de sostenibilidad alcanzado por la solución estructural estudiada. Frente al Análisis del Ciclo de Vida (ACV), tiene la ventaja de que emplea términos conocidos por el técnico (arquitecto, ingeniero) normal, si bien no permite hacer comparaciones entre estructuras de materiales diferentes (acero, madera), cosa que sí permite el ACV.

Durante el desarrollo de esta Tesis se han manejado multitud de datos cuantitativos (no adimensionales), relativos al desempeño de la estructura o sus componentes, en las diferentes vertientes del análisis que aquí se ha realizado. Se han tratado desarrollos y resultados de análisis de ciclo de vida, tanto en el ámbito ambiental como en el económico y social. El volumen de información recopilada y los análisis propios realizados permitían enriquecer el modelo de evaluación, aunque la intención era mantener un sistema similar al planteado por el Anejo 13 de la EHE-08, facilitando su aplicación a evaluadores no expertos.

En este contexto, se ha optado por añadir al modelo presentado anteriormente un panel de indicadores numéricos, independiente de la estructura que permite el cálculo del ICES. Este panel está orientado a aportar una información complementaria acerca del desempeño ambiental, económico y social de la estructura analizada, y permite hacer comparaciones con estructuras de otros materiales diferentes del hormigón estructural.

Se han seleccionado dos indicadores ambientales (consumo energético total y emisión de CO₂), dos indicadores económicos (coste de inversión inicial y coste anual equivalente) y un indicador social (volumen total de mano de obra generada). En la Tabla T10.38 se describen sus características y fuentes de obtención.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Ámbito	Indicador	Características	Procedencia
Ambiental	Consumo energético total (GJ)	Integra el total de energía primaria consumida en la construcción de la estructura de hormigón, incluyendo la producción de sus componentes y todos los procesos auxiliares asociados.	Pueden obtenerse a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o, alternativamente, empleando el modelo de cálculo incluido en el Capítulo 7 (epígrafe 7.4).
	Emisión total de dióxido de carbono (kg CO ₂)	Integra el total de las emisiones atmosféricas de CO ₂ asociadas a la construcción de la estructura de hormigón, incluyendo la producción de sus componentes y todos los procesos auxiliares asociados.	
Económico	Coste de inversión (€)	Comprende el coste total de la estructura, una vez construida y puesta en servicio, sin incluir su mantenimiento posterior ni su desmantelamiento, una vez finalizado su periodo de servicio.	Presupuesto incluido en proyecto constructivo o documentación final de obra.
	Coste anual equivalente (€/año)	Repercusión del coste de inversión inicial más los costes asociados a la inspección, mantenimiento periódico y reparaciones estimadas, durante el periodo de servicio (vida útil) de la estructura.	Puede obtenerse a través de un Análisis de Coste del Ciclo de Vida, o bien añadiendo a los costes de inversión inicial la estimación de los costes futuros, y dividiendo el resultado por la vida útil esperada de la estructura. Estos costes se pueden encontrar en determinadas bases de datos de precios españolas y, por otro lado, en el Capítulo 8 (epígrafe 8.3.2) se aportan datos de ayuda para su cálculo.
Social	Volumen total de mano de obra generada (horas de trabajo)	Integra el volumen total de trabajo generado en la construcción de la estructura de hormigón, incluyendo la producción de sus componentes y todos los procesos auxiliares asociados.	Puede obtenerse a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o, alternativamente, empleando el modelo de cálculo incluido en el Capítulo 8 (epígrafe 8.4.4).

Tabla T10.38: *Panel de indicadores complementarios para el modelo de evaluación de la sostenibilidad.*

10.7. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En los epígrafes anteriores se ha abordado, con toda la extensión requerida para una completa comprensión del mismo, el desarrollo de un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad en estructuras de hormigón, principal objetivo de esta Tesis Doctoral. Por este motivo, puede considerarse este capítulo como su núcleo.

El modelo desarrollado presenta la característica de integrar gran parte de la información relativa a la sostenibilidad recopilada anteriormente, así como los resultados de trabajos previos realizados en este sentido, en una estructuración y esquema básico muy similares a los del actual modelo de evaluación ofrecido por la EHE-08, que ha sido pionero en este ámbito a nivel mundial. Sin embargo, el modelo es aplicable en entornos no normativos, o en entornos de normativa diferente a la EHE-08.

El presente modelo alcanza un nivel de completitud mayor que el de la EHE, abarcando una mayor cantidad de aspectos y confrontando su ponderación con los resultados de estudios basados en la metodología de Análisis del Ciclo de Vida. Se ha procurado mantener la práctica totalidad de los aspectos incluidos en el Anejo 13, si bien con organización y ponderaciones distintas, y con matices diferenciadores.

La salida del modelo continúa siendo un valor adimensional comprendido entre 0 y 1, que también se llama Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES). A su vez, el ICES está formado por la suma ponderada de tres índices (ISMA, ISE e ISS) que representan, respectivamente, los aspectos ambientales, económicos y sociales de la sostenibilidad.

Además de dicho modelo, en este capítulo se presenta un panel de indicadores complementarios, cuantitativos (no adimensionales), que pueden ilustrar el desempeño concreto de una estructura en los ámbitos anteriores, y permitir comparaciones con estructuras de otros materiales diferentes del hormigón estructural.

El objeto final, tanto del ICES como del panel de indicadores complementarios, es permitir la comparación entre diferentes alternativas estructurales, sea en fase de diseño, sea tras la ejecución. Su empleo puede servir de gran ayuda en la toma de decisiones.

Se reconoce, finalmente, que la exposición realizada a lo largo de este capítulo puede resultar árida en cuanto a su implantación práctica. Para conseguir una mejor comprensión de la misma, y simultáneamente, probar el modelo y demostrar sus capacidades, se incluye en el capítulo siguiente el análisis de un caso práctico.

CAPÍTULO 11: ANÁLISIS DE UN CASO PRÁCTICO

CAPÍTULO 11: ANÁLISIS DE UN CASO PRÁCTICO

11.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha expuesto el nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad en estructuras de hormigón, cuyo desarrollo era uno de los principales objetivos de esta Tesis doctoral. El modelo propuesto está formado por un total de 25 indicadores, repartidos en cuatro índices parciales a partir de los cuales se calcula el Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES).

El número de variables a introducir en dichos indicadores hace necesaria la recopilación de una gran cantidad de información concerniente a la estructura a evaluar. El proceso de cálculo no es complejo, pero sí hay una gran cantidad de operaciones a realizar. Por todo ello se incluye aquí un ejemplo completo de aplicación del modelo desarrollado. En él se procede a la determinación del ICES, de sus índices parciales (ISMA, ISE, IEVU, ISS), y de los indicadores complementarios, para una estructura de hormigón armado, partiendo de un “caso base” sobre el que se plantearán diferentes variantes, para estudiar sus consecuencias.

El objetivo principal de este capítulo es la ayuda a la comprensión del modelo de evaluación de la sostenibilidad, motivo por el que se parte de una estructura sencilla, tomada de Gómez et al. (2012) y sobre ella se establecen una serie de supuestos base, algunos de los cuales se modifican para generar cambios en el valor que toman determinadas variables de diferente importancia.

11.2. DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA A ANALIZAR

11.2.1. Características técnicas y constructivas

Se trata de una estructura de edificación industrial, formada por una cimentación superficial con zapatas aisladas unidas por vigas de atado, una estructura de cubierta de madera laminada encolada apoyada sobre pilares de hormigón armado, vigas de arriostramiento de hormigón armado, y solera convencional.

El edificio tiene planta rectangular, con dimensiones aproximadas 20 x 40 m, mientras que la altura de los pilares es variable, según se aprecia en la Figura F11.1. Los cerramientos están constituidos por materiales de carácter no estructural. De este modo, la evaluación de la sostenibilidad se ceñirá a los grupos de elementos mencionados (cimentación, pilares, arriostramiento y solera).

La construcción se encuentra situada en la provincia de A Coruña, en una zona de abundantes precipitaciones repartidas a lo largo de todo el año, y situada a más de 5 km de la línea de costa. La clase de exposición general, según el Artículo 8 de la EHE-08, es IIa (humedad alta). No se observa la necesidad de considerar clases de exposición específicas.

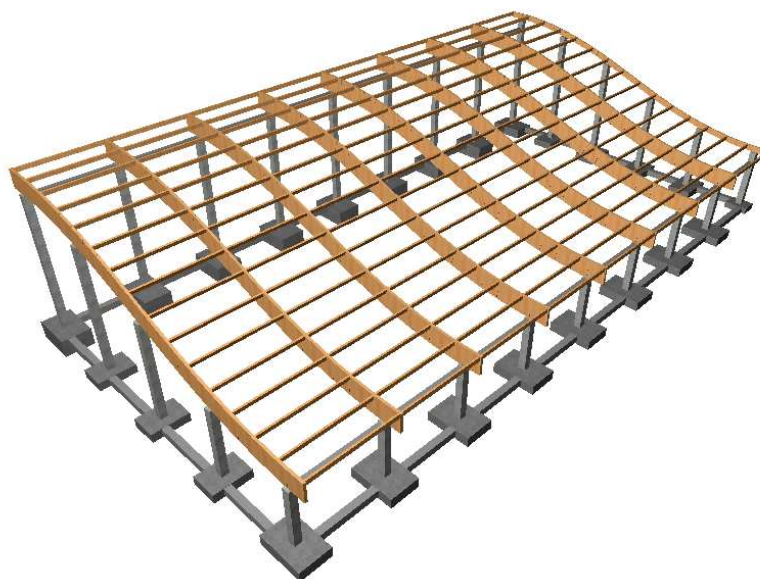


Figura F11.1.- Representación de la estructura empleada como caso de estudio (Gómez et al, 2012).

Se utilizan dos tipos de hormigón diferentes:

- HA-25/P/20/IIa para la ejecución de cimentaciones y solera, procedente de central, de relación a/c = 0,60 y dosificación por m³ de 316,70 kg de cemento, 690,60 kg de árido fino, 1251,40 kg de árido grueso y 190 kg de agua. Se añade una pequeña cantidad de plastificante para mejorar la trabajabilidad del material.

- HA-40/P/20/IIa para la ejecución de pilares y vigas, procedente de central, de relación a/c = 0,45 y dosificación por m³ de 422,20 kg de cemento, 640,80 kg de árido fino, 1211,00 kg de árido grueso y 190 kg de agua. Se añade una pequeña cantidad de plastificante para mejorar la trabajabilidad del material.

En ambos casos se emplea cemento sin adiciones, del tipo CEM I, según RC-16 (contenido mínimo de clinker 95%). No se añaden tampoco adiciones al hormigón, ni se emplean aditivos de otro tipo, al margen del plastificante. Los hormigones están en posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido, conforme al apartado 5 del Anejo 19 de la EHE-08.

Según las mediciones Gómez et al (2012), la cimentación supone una cantidad total de 85,66 m³ de hormigón, armado con 5.392,54 kg de acero corrugado B500 S (62,95 kg acero / m³). En la solera se emplean 171,83 m³ de hormigón y 4.267,35 kg de acero B500 S en malla electrosoldada 15x15 cm D=8mm (24,83 kg acero / m³).

Los pilares y vigas de arriostramiento consumen 27,51 m³ de hormigón, con una cuantía de armado en acero B500 S de 120 kg / m³ (3.301,20 kg de acero).

Las armaduras empleadas están certificadas (marca "N" de AENOR), siendo elaboradas en taller, empleando uniones soldadas. Aproximadamente un 40% de las armaduras corresponden a formas normalizadas según UNE 36.831.

Todos los áridos empleados en la fabricación de los hormigones proceden de cantera, no empleándose áridos reciclados.

No se emplean en la estructura elementos prefabricados ni dotados de armadura activa.

Se adoptan los recubrimientos mínimos estipulados en EHE-08, prolongando durante una semana el curado del hormigón mediante riego con agua. No se emplean medidas específicas de protección superficial ni de las armaduras.

El proyecto técnico en base al cual se ejecuta la estructura incluye, entre otros documentos e informaciones:

- Un estudio técnico-económico de diferentes alternativas estructurales posibles, en base al cual se justifica la solución adoptada.
- Un cálculo estimativo de su vida útil, en base al modelo de corrosión por cloruros propuesto en el Anejo 9 de la EHE-08, que permite afirmar que la estructura puede alcanzar el periodo de servicio mínimo de 50 años que marca la Instrucción.
- La prescripción de un nivel de control de ejecución intenso, circunstancia materializada en la ejecución en obra, que permite aplicar la disminución del coeficiente de seguridad γ_s según indica el punto 15.3.1 de la EHE-08. Se incluye un anejo de control de calidad, especificando el número y tipo de ensayos y probetas a realizar. Durante la ejecución se sigue dicho plan de control, siendo todas las probetas de tipo cilíndrico. No se prescribe en proyecto, ni se realiza en obra, ningún ensayo específicamente relacionado con la durabilidad (permeabilidad, resistividad, etc.).

Por otra parte, en el proyecto no se incluye información específica y detallada acerca de los costes de mantenimiento y desmantelamiento o demolición de la estructura, ni tampoco de los procedimientos para el vibrado y curado del hormigón y el montaje y desmontaje de encofrados.

11.2.2. Características funcionales.

El edificio del que forma parte la estructura está destinado a fines industriales, incluyendo zonas de proceso, almacenamiento y administración. No se requieren de la estructura condiciones especiales de adaptación a equipos industriales, ni se dan circunstancias que impliquen una clase de exposición específica. La vida útil mínima, establecida por la EHE-08, es de 50 años.

No se ha realizado un cálculo sobre la estructura realmente ejecutada que permita certificar que la sobrecarga de uso admisible es mayor de la indicada en proyecto. Por otra parte, en el elemento más desfavorable, la deformación máxima calculada es un 20% inferior a la máxima permitida por la EHE-08 en el estado límite de deformación.

Por sus características, la estructura no está diseñada para proporcionar aislamiento térmico ni acústico; el hormigón de pilares y vigas de arriostramiento queda a la vista y dicha circunstancia se tiene en cuenta con respecto a su acabado.

La obra está promovida por una empresa privada, no habiendo declaración de interés público por parte de la Administración.

11.2.3. Otras características.

Por motivos logísticos y económicos, el hormigón empleado en la obra procede de dos plantas diferentes. La cimentación y la estructura (pilares y vigas), ejecutados respectivamente en HA-25 y HA-40, reciben el hormigón de la planta nº 1 (un 39,7% del total consumido). Para la solera, realizada con posterioridad a los elementos anteriores, se emplea HA-25 procedente de la planta nº 2 (60,3% del total de hormigón consumido).

La planta de hormigón nº 1 está situada a 30 km de la obra; está certificada medioambientalmente según ISO 14001, cuenta con un sistema de reducción del consumo de agua, reaprovechando en el proceso las aguas de lavado de las cubas, y recicla el 35% de los residuos generados. En ella trabajan dos empleados, ambos varones, con contrato indefinido. Los dos cuentan con titulación de enseñanza media en ciclos formativos relacionados con el sector de la construcción y están dados de alta de forma acorde a su titulación. Durante el último año, los empleados han recibido 8 horas de formación por persona, sobre seguridad en el trabajo con equipos mecánicos y eléctricos. La planta no tiene certificado su sistema de gestión de riesgos laborales. El 90% de las materias primas consumidas procede de la misma provincia, en el caso de los áridos, o de una provincia limítrofe, en el del cemento. El 10% restante, principalmente aditivos y suministros de otro tipo (repuestos, consumibles, etc.) procede del resto del territorio nacional. Del mismo modo, cuando se necesita subcontratar personal externo para realizar algún trabajo (habitualmente, reparaciones o modificaciones de máquinas y equipos) en el 90% de los casos se recurre a empresas del entorno próximo, y únicamente en un 10% de las ocasiones es necesario trabajar con empresas procedentes de provincias no limítrofes. El cemento empleado en la planta procede de la cementera nº 1, situada a

200 km de la planta; mientras que los áridos proceden de la cantera nº 1, situada a 15 km de la planta.

La planta de hormigón nº 2 está situada a 15 km de la obra; está certificada medioambientalmente según ISO 14001, no cuenta con un sistema de reducción del consumo de agua y recicla el 48% de sus residuos. Cuenta también con dos empleados varones, de los cuales uno tiene contrato indefinido y el otro, temporal. El empleado fijo cursó estudios de formación profesional de segundo grado en delineación, estando contratado de modo acorde a su categoría, mientras que el otro empleado posee únicamente la educación obligatoria. Durante el último año, los empleados han recibido 12 horas de formación por persona: un curso de instrucción en un nuevo tipo de software de control de planta y otro relativo al sistema de gestión medioambiental. La planta no tiene certificado su sistema de gestión de riesgos laborales. El 70% de las materias primas consumidas procede de la misma provincia, en el caso de los áridos, o de una provincia limítrofe, mientras que el 30% restante, incluyendo el cemento, procede del resto del territorio nacional. Cuando se necesita subcontratar personal externo para realizar algún trabajo (habitualmente, reparaciones o modificaciones de máquinas y equipos) en el 80% de los casos se recurre a empresas del entorno próximo, y en un 20% de las ocasiones es necesario trabajar con empresas procedentes de provincias no limítrofes. El cemento empleado en la planta procede de la cementera nº 2, situada a 400 km de la planta; mientras que los áridos proceden de la cantera nº 2, situada a 5 km de la planta.

La cementera nº 1 es una fábrica certificada según las normas ISO 14001 y OSHAS 18000. El 22% de su plantilla está contratada de modo temporal; el 35% del total de los empleados son mujeres, y el 40% dispone, como mínimo, de estudios de nivel medio y están dados de alta de forma acorde a su titulación. Durante el último año ha impartido una media de 16 horas de formación por empleado, principalmente orientada a aspectos técnicos de proceso y a la prevención de riesgos laborales, y ha registrado un índice de incidencia de accidentes laborales equivalente a 3.227,25 accidentes por cada 100.000 trabajadores. La media de la industria manufacturera se sitúa en 4.609,20 accidentes por cada 100.000 trabajadores, según la estadística publicada por el Ministerio de Empleo y Seguridad Social. La empresa retribuye adicionalmente a sus empleados mediante beneficios sociales, con cheques de comida y guardería. El 5% del combustible utilizado por la planta es de tipo biomasa. La cantera de la que se extrae la materia prima se encuentra en las inmediaciones de la fábrica, aproximadamente a 1 km, y se emplean cintas transportadoras para su traslado. Dicha cantera emplea cubas de riego para reducir la generación de polvo. Estos materiales de origen local suponen hasta el 80% de los suministros, mientras que el 20% restante procede de provincias no limítrofes, dentro del territorio nacional. Habitualmente se subcontratan servicios de mantenimiento, reparaciones, limpieza, etc., que en el 70% de las ocasiones realizan empresas cercanas a la planta, y en los restantes casos provienen del resto del territorio nacional. Se recicla el 30% de los residuos generados, y se ha puesto en marcha un programa de reducción del consumo de agua, que procede de una captación propia. La planta ha participado en los últimos años en un proyecto de investigación conducido por una universidad pública, relativo a la sustitución de combustibles en la industria cementera. Fruto de ese trabajo es el mencionado empleo de un 5% de biomasa. La empresa patrocina a sendos equipos locales de fútbol-sala y baloncesto, con un presupuesto del orden del 0,3% de su facturación anual, y mantiene una página web y un canal abierto de comunicación en redes sociales relativos a su actividad industrial y comercial.

La cementera nº 2 cuenta también con certificaciones ISO 14001 y OSHAS 18000. El 30% de su plantilla está contratada de modo temporal. El 32% del total de los empleados son mujeres y el 42% dispone, como mínimo, de estudios de nivel medio y están dados de alta de forma acorde a su

titulación. Durante el último año ha impartido una media de 12 horas de formación por empleado, principalmente orientada a aspectos de calidad y medio ambiente, y ha registrado un índice de incidencia de accidentes laborales de 4.148 accidentes por cada 100.000 trabajadores. La totalidad de los combustibles empleados son de origen fósil (carbón y gasóleo), mientras que un 4% de sus materias primas son residuos de construcción de procedencia cercana. La cantera de la que se extrae la materia prima se encuentra a 15 km de distancia, careciendo de sistemas para reducir la generación de polvo. Los materiales de origen provincial suponen un 65% de los suministros, mientras que el 35% restante, incluyendo combustibles de origen fósil, procede de provincias no limítrofes, dentro del territorio nacional. El 75% de las subcontrataciones se realizan con empresas de la provincia o de provincias limítrofes, el 20% con empresas del resto del territorio nacional, y un 5% con empresas procedentes del extranjero (principalmente el mantenimiento de determinados equipos de proceso). Se recicla el 43% de los residuos generados, y se dispone de un sistema de reducción del consumo de agua en proceso. La empresa apoya económicamente a una fundación de ayuda a personas discapacitadas con un 0,5% de su facturación anual, y elabora anualmente una memoria de Responsabilidad Social que hace pública, junto con otros datos de interés, a través de su página web.

La cantera de áridos nº 1 es una instalación que carece de certificación ambiental, en la que un 10% de los trabajadores es de sexo femenino y el 50% del total de empleados tiene un contrato de trabajo temporal. El 88% de los trabajadores cuenta únicamente con formación básica (personal no cualificado). Se imparte una media de 6 horas de formación por persona y año, a través de un curso de prevención de riesgos laborales en industrias extractivas. Tanto los suministros de material como las subcontrataciones de personal son de origen provincial o de las provincias limítrofes. Los áridos suministrados para la preparación de hormigón proceden del machaqueo de rocas graníticas; se riegan las vías de rodadura para mitigar la generación de polvo, no contando con sistemas de reducción del consumo de agua. Se recicla aproximadamente la mitad de los residuos generados.

La cantera de áridos nº 2 es similar a la anterior, estando su sistema de gestión de Prevención de Riesgos Laborales (PRL) certificado según OSHAS 18000. Un 10% de sus trabajadores tiene un contrato de trabajo temporal. El 90% de los empleados cuenta únicamente con formación básica (personal no cualificado), y todos son varones. Se imparte una media de 10 horas de formación por persona y año, principalmente en materia de PRL. El año pasado registró un índice de incidencia de 10.313 accidentes por cada 100.000 empleados, lo que supone un 14% menos que la media registrada por las estadísticas oficiales para el sector de las industrias extractivas, que es de 11.991,9 accidentes por cada 100.000 trabajadores. Tanto los suministros de material como las subcontrataciones de personal son de origen provincial o de las provincias limítrofes. Los áridos suministrados para la preparación de hormigón proceden del machaqueo de rocas graníticas. Las vías de rodadura internas están asfaltadas para mitigar la generación de polvo, no contando con sistemas de reducción del consumo de agua. Se recicla aproximadamente la mitad de los residuos generados. La empresa propietaria de la cantera colabora con el ayuntamiento en la organización de actividades culturales y deportivas al aire libre durante los meses de verano, aportando un 0,1% de su facturación anual.

Todo el acero empleado en la obra procede del mismo fabricante, una planta española de tipo EAF situada aproximadamente a 1000 km de la instalación donde se elaboran las armaduras. La planta siderúrgica está certificada según las normas ISO 14001 y OSHAS 18000. El 55% de sus empleados están cualificados con un nivel mínimo de formación profesional y están contratados de acuerdo a su categoría, y el 75% cuentan con contrato laboral indefinido. Un 20% de los empleados son mujeres; la empresa participa en un programa de inclusión de personas discapacitadas, retribuye

complementariamente a sus empleados mediante beneficios sociales y mantiene un programa de conciliación que permite la flexibilidad horaria y la reducción de jornada para trabajadores con menores o personas dependientes a su cargo. Sus trabajadores reciben una media de 18 horas por persona de formación al año, repartidas generalmente en cursos breves de calidad, prevención y medio ambiente. El índice de incidencia registrado durante el último año está un 40% por debajo de la media correspondiente. La empresa está involucrada en dos proyectos de investigación financiados por el Ministerio de Industria, orientados a desarrollar tecnologías eficientes que progresivamente son incorporadas al proceso industrial. En la planta se reciclan un 50% de las escorias siderúrgicas y un 28% de los restantes residuos, sin que se hayan implantado por ahora mejoras encaminadas a reducir el consumo de agua. El acero producido tiene un contenido en chatarra del 95%; dicha chatarra proviene en gran parte del exterior de la UE. La planta dispone de equipos de control radiológico para la comprobación del material entrante. Un 30% de los suministros llegan a la planta desde la propia provincia o provincias limítrofes, otro 30% procede del resto del territorio nacional y un 40% del extranjero. No existen certificaciones específicas sobre la sostenibilidad o el origen responsable de las materias primas procedentes de fuera de la UE. En lo referente a la subcontratación de trabajadores y empresas, el 80% tiene su origen en la provincia o sus alrededores, el 15% en el resto del país, y el 5% es de procedencia internacional. La empresa patrocina una fundación y numerosas iniciativas socio-culturales, deportivas y de voluntariado, a las que dedica en conjunto un 0,35% de su facturación anual; elabora anualmente una memoria de Responsabilidad Social Corporativa (RSC) y difunde información acerca de sus actividades a través de internet y las redes sociales.

Las armaduras son elaboradas en una planta de ferralla situada a 40 km de la obra, en la que el 40% de los empleos son temporales. El 15% de los empleados son mujeres, y el 35% del total se consideran empleos cualificados y dados de alta en consonancia a su titulación. La empresa aporta a sus trabajadores una media de 8 horas de formación anual por persona, y complementa sus salarios con beneficios sociales, con vales de comida y abonos de transporte. La planta está certificada ISO 14001 y OSHAS 18001. Durante el último año su número de accidentes por cada 100.000 trabajadores supera al de la media del sector. El 95% de sus suministros (acero) procede de provincias no limítrofes, y el 5% restante es de origen internacional. Cuando se subcontratan servicios o trabajadores, en el 90% de los casos se recurre a empresas de la misma provincia, y en los restantes casos (habitualmente mantenimientos de equipos específicos) proceden del resto del territorio nacional. La empresa es patrocinadora de un equipo de piragüismo, al que aporta un 0,25% de su facturación anual, y ha colaborado recientemente en un proyecto de investigación con una universidad española.

Por último, la empresa constructora encargada de la obra contrata al 80% de su personal de forma temporal, y únicamente un 10% son mujeres. El porcentaje de trabajadores cualificados (al menos con estudios de formación profesional) y con contrato acorde a su titulación es del 15%, y los empleados reciben una media de 4 horas de formación al año, por persona. No dispone de certificaciones de sus sistemas de gestión; acredita el reciclaje del 20% de sus residuos. Adquiere la totalidad de sus suministros a proveedores de la propia provincia o provincias limítrofes, de donde también proceden el 80% de sus subcontratas. Existe un 20% de la subcontratación de origen internacional, debido a que determinados trabajos los suelen encargar a una empresa portuguesa. Colabora con una asociación de ayuda a personas sin hogar, a la que asigna aproximadamente un 0,4% de su facturación anual.

11.3. DETERMINACIÓN DEL ICES PARA EL CASO BASE

11.3.1. Introducción.

Tomando como base la información recopilada en 11.2, se aplican las tablas incluidas en el Capítulo 10 para obtener las puntuaciones correspondientes a los diferentes indicadores, y en base a ellos obtener los índices parciales (ISMA, ISE, ISS) y el Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad. La Figura F11.2 incluye una parte de los cálculos realizados, correspondiente al indicador medioambiental M3, dedicado a la producción del cemento.

Indicador M3: producción del cemento								
Función de Valor	mi	ni	Ai	ki				
Valor parámetros FValor	-0,1	0,3	4	1				
Cemento #1: % sobre total	0,397							
Valores λ_{M3x} Tabla T10.6	λ_{M31}	λ_{M32}	λ_{M33}	λ_{M34}	λ_{M35}	λ_{M36}	λ_{M37}	λ_{M38}
Puntuaciones Cemento #1	5	8,33	0	0	20	3	5	1,5
Total Cemento #1 (Σ λ_{M3x})	42,83							
Cemento #2: % sobre total	0,603							
Valores λ_{M3x} Tabla T10.6	λ_{M31}	λ_{M32}	λ_{M33}	λ_{M34}	λ_{M35}	λ_{M36}	λ_{M37}	λ_{M38}
Puntuaciones Cemento #2	5	0	0	8	12	0	5	2,15
Total Cemento #2 (Σ λ_{M3x})	32,15							
Puntuación total M3	0,36							
Índice satisfacción (valor) M3	0,19							

Figura F11.2.- Ejemplo parcial de cálculo del caso base: indicador M3 (producción del cemento).

En dicha figura se pueden observar, primeramente, los parámetros de la función de valor. Al existir dos suministros diferentes de cemento, uno para cada una de las dos plantas de hormigón que surten a la obra, se determinan las puntuaciones correspondientes a cada uno y se ponderan en base a su proporción de empleo en obra. En este caso, el 39,7% del cemento, destinado a la cimentación y la estructura, proviene de una fábrica y el 60,3% restante, dedicado a la solera, proviene de otra fábrica. En la Figura F11.2 se muestran los valores que toman, para cada cemento, los parámetros λ_{M3x}^M de la Tabla T10.6 del Capítulo 10. Se muestra también su sumatorio para cada cemento y, tras ello, el sumatorio ponderado con los porcentajes de cemento empleados (Puntuación total M3). Este último valor es el que se toma como argumento para aplicar la función de valor y obtener el valor o índice de satisfacción para este indicador M3.

11.3.2. Índice de Sensibilidad Medioambiental (ISMA).

En el indicador ambiental M1, el único aspecto en el que la estructura obtiene puntuación es debido a que el proyecto justifica que la solución adoptada es la alternativa óptima, tanto desde el punto de vista técnico como desde el económico. No se utilizan elementos estructurales prefabricados ni pretensados.

El indicador M2, relativo a la sistemática del control de ejecución, puntúa la adopción de un nivel de control intenso, que permite la disminución de los coeficientes de seguridad γ_s y γ_c , por cumplimiento de lo recogido en el punto 15.3.2 de la EHE-08, en los cálculos. En lo referente al control de calidad, no se obtiene puntuación debido a que no se utilizan probetas cúbicas, según se ha indicado en 11.2.1.

El indicador M3, dedicado a la producción del cemento, se reparte proporcionalmente entre los dos cementos utilizados (39,7% procedente de la cementera nº1 y 60,3% de la cementera nº2). Entre los aspectos principales, se puede destacar que la primera de las plantas utiliza un 5% de combustibles alternativos, mientras que la segunda emplea únicamente combustibles fósiles, pero emplea un 4% de residuos como materia prima. Siendo estos valores relativamente modestos, la puntuación total obtenida en este importante indicador es reducida. No se emplean adiciones de ningún tipo en los cementos (ambos del tipo CEM-I), por lo que la puntuación obtenida en el indicador M4 es nula.

En el caso del acero empleado, su elevado contenido en material reciclado permite alcanzar una puntuación elevada en el indicador M5. La certificación de las armaduras y de la planta en la que se elaboran se valora positivamente, compensando la falta de puntuación debida al empleo de la solución de uniones soldadas frente al atado, y dejando el indicador M6 en un valor medio.

El indicador M7 es el referido a la producción de áridos, y aunque éstos proceden de dos instalaciones diferentes, a efectos de los aspectos valorados en este indicador, sus características son idénticas. En ambos casos los únicos aspectos positivos a puntuar son el reciclaje de una fracción de los residuos y el riego con agua para evitar la formación de polvo.

En la evaluación de los procesos de transporte (indicador M8) entran en juego las distancias existentes en las diferentes etapas, que difieren en función de la procedencia del hormigón. Para el empleado en la estructura y cimentación (39,7% del total), la planta se encuentra a 30 km de la obra, el cemento a 200 km de la planta y la cantera a 15 km de la planta. En el caso de la solera (60,3% del total) la planta es más cercana a la obra (15 km) y la cantera más cercana a la planta (5 km), si bien el cemento procede de una instalación más distante (400 km). Todo el acero procede del mismo suministrador, transportándose por carretera durante 1000 km hasta la instalación de ferralla, que dista 40 km de la obra.

Por último, el indicador M9 valora el comportamiento ambiental de las dos plantas cementeras implicadas y de la propia empresa constructora, aspectos en los que las puntuaciones alcanzadas son bajas.

La Tabla T11.1 resume los resultados obtenidos en la evaluación de los indicadores anteriores, en la forma de los índices de satisfacción o coeficientes de valor para cada uno, resultado de aplicar las diferentes funciones de valor a las puntuaciones obtenidas al aplicar las tablas T10.4 a T10.12 del Capítulo 10. A partir de este momento se empleará el término coeficiente de valor como sinónimo de índice de satisfacción.

Indicadores Medioambientales	Coeficiente de valor
Indicador M1 – Optimización del consumo de materiales	$V^M_1 = 0,51$
Indicador M2 – Sistemática del control de ejecución	$V^M_2 = 0,86$
Indicador M3 – Producción del cemento	$V^M_3 = 0,19$
Indicador M4 – Caracterización del cemento	$V^M_4 = 0,00$
Indicador M5 – Producción del acero	$V^M_5 = 0,99$
Indicador M6 – Caracterización de las armaduras	$V^M_6 = 0,51$
Indicador M7 – Producción de áridos	$V^M_7 = 0,07$
Indicador M8 – Impacto de los procesos de transporte	$V^M_8 = 0,66$
Indicador M9 – Impacto de los procesos de elaboración y ejecución	$V^M_9 = 0,09$

Tabla T11.1.- Coeficientes de valor (índices de satisfacción) obtenidos para cada uno de los indicadores ambientales.

Para obtener el Índice de Sensibilidad Medioambiental (ISMA) se multiplican estos resultados por los coeficientes de ponderación de la Tabla T10.3 del Capítulo 10, de acuerdo con la expresión [E10.3] de aquel capítulo. Con ello se obtiene un ISMA de 0,39. Este valor resulta bajo, debido a que las características de este caso base se han establecido en base a circunstancias que no suponen un buen desempeño ambiental, en particular en los indicadores relativos al cemento (M3 y M4), que son los más influyentes sobre el resultado global. Como se verá en epígrafes posteriores, la mejora de las variables relacionadas con estos aspectos puede incrementar el valor final del índice de un modo apreciable.

11.3.3. Índice de Sensibilidad Económica (ISE).

Para determinar el Índice de Sensibilidad de Económica es necesario, en primer lugar, determinar el denominado "*carácter de la estructura*"; véanse las expresiones E10.16 y E10.17 y el epígrafe 10.4.3.2 del Capítulo 10. Este parámetro que determinará la ruta a seguir dentro del esquema de cálculo plasmado en la Figura F10.12 de dicho capítulo.

Según las condiciones expuestas en 11.2.2, la estructura se proyecta para un servicio permanente, con una vida útil mínima de 50 años. Está destinada para servir de alojamiento a una actividad industrial, si bien no es una construcción específicamente ajustada a un equipo o instalación concretos. No se han descrito las características de dicha actividad, ni se determina si existen condicionantes o limitaciones temporales a la misma.

En base a lo anterior, se adopta un valor $c = 1$ para el *carácter de la estructura*; el ISE quedará entonces configurado como el sumatorio ponderado de los indicadores económicos E1, E2 y el Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU). Éste último estará afectado, además, por la *probabilidad de obsolescencia prematura* (POP).

La elección de la probabilidad de obsolescencia prematura queda en gran parte en manos del evaluador, dado que es un parámetro particular para cada obra y difícil de encajar en una clasificación predeterminada (Capítulo 10, epígrafe 10.4.3.4). Para edificios industriales, la Tabla T10.19 del Capítulo 10 recomienda valores de entre 0,25 y 0,75, debido a la dependencia que puede existir entre la vida real de la estructura y la vigencia de la actividad a la que da cobijo. En este caso se carece de información detallada de la industria que motiva la construcción de la estructura, aunque se observa que ésta es de tipo convencional; por tanto, llegado el caso, podría seguir funcionando una vez renovados los equipos instalados en su interior. Puede señalarse también una cierta particularidad estética del edificio, que presenta una cubierta singular con arcos de madera laminada encolada apoyados en pilares de diferente altura, lo cual puede ayudar a que en el futuro se considere su valor arquitectónico y, por ello, se abogue por su conservación. Las dos circunstancias mencionadas podrían acercar a estructura a la consideración de edificación terciaria, en el sentido de que igualmente podría ser útil para alojar un centro comercial o recreativo, entre otras funciones. Para este tipo de edificios, en T10.19 se considera una POP de hasta 0,15. A juicio del técnico responsable de la aplicación del modelo de evaluación a la estructura, en este caso se opta por una situación intermedia entre la actividad industrial y terciaria, con un valor $POP = 0,20$. Es decir, se considera que existe un 20% de posibilidades de que la estructura quede fuera de servicio antes de 50 años, por

motivos ajenos a la misma, frente a un 80% de posibilidades de que sea el deterioro de la estructura y el incumplimiento de los estados límites de diseño lo que marque su demolición o rehabilitación.

Entrando ya en la evaluación de indicadores, en E1 se valora el estudio de costes realizado durante la fase de proyecto, que debería ayudar a tomar las decisiones de inversión óptimas. En el caso considerado, el estudio de alternativas incluido en el proyecto (ya valorado en el indicador M1) incluía también su estimación económica, y por ello se contabiliza también aquí. No existen, por contra, análisis del coste del ciclo de vida ni determinación de los costes de mantenimiento o del coste de demolición o desmantelamiento de la estructura.

En el indicador E2, que evalúa la funcionalidad alcanzada por la estructura, se puede valorar que se alcance una deformación máxima, en el elemento más desfavorable, un 20% inferior a la máxima permitida por la EHE-08. No se incluye en el proyecto un segundo cálculo para certificar la posibilidad de incrementar la carga de uso máxima definida previamente, sin exceder los márgenes de seguridad. En realidad no es habitual que se realice dicho cálculo, que se ha incluido en la Tabla T10.16 del Capítulo 10 con la idea de poder aprovechar el margen adicional de seguridad que aportan a las estructuras las secciones y dimensiones correspondientes a la ejecución real. Para ello sería necesario repetir el cálculo de la estructura, una vez definida por completo su geometría y características, con sucesivos valores crecientes de carga de uso. En cuanto a los restantes aspectos del indicador, el único que puede considerarse es el estético, en base a que se ha indicado que el hormigón queda visto y se le aplicará un acabado consecuente con ello, y que el propio diseño de la estructura implica el diálogo entre dos materiales diferentes como son el hormigón y la madera estructural.

Los restantes indicadores económicos pertenecen ya al Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU) y se centran en la evaluación del comportamiento de la estructura en materia de durabilidad, siempre vinculados a la clase de exposición ambiental. En este caso, todas las partes de la estructura se consideran en ambiente de humedad alta (clase IIa).

El indicador V1 atiende, nuevamente, a las especificaciones del proyecto en lo referente a la durabilidad. En este caso el proyecto incluye la identificación de puntos conflictivos y zonas de riesgo de fisuras, acumulaciones de agua, etc., así como la inclusión de medidas correctoras que minimicen las hipotéticas consecuencias negativas. Se detalla también la inexistencia de materiales galvánicamente incompatibles en contacto.

En el indicador V2 se valora la dosificación del hormigón, en este caso de forma proporcional a los dos hormigones empleados. La solera y la cimentación emplean HA-25, con relación a/c = 0,60 (máxima permitida por la EHE-08) y un contenido en cemento de 316,7 kg/m³ (superior al mínimo establecido de 275 kg/m³). Este hormigón supone el 90,3% del total empleado en la obra. Los pilares y las vigas de arriostramiento se ejecutan en HA-40, con relación a/c = 0,45 y un contenido en cemento de 422,2 kg/m³, suponiendo un 9,7% del total. Por lo demás, en ambos casos se utiliza exclusivamente cemento CEM-I, no incorporando materiales cementantes suplementarios. Como aditivos se añaden plastificantes para mejorar la trabajabilidad, aunque únicamente en el caso del HA-40 son del tipo “superplastificantes”, valorados positivamente en vista de que permiten reducir la relación a/c. La obtención de una baja puntuación en este indicador importante penaliza el valor final del índice.

El indicador V3 está referido a la ejecución de la estructura, valorando la adopción de un nivel de control intenso, al igual que se hizo ya en el indicador M2. En obra se ha realizado el curado del hormigón mediante riego durante una semana, especialmente en la solera, para evitar la aparición de fisuras. No constan en proyecto, sin embargo, especificaciones detalladas en este sentido, más allá de las prescripciones generales tomadas de la EHE, incluidas en el Pliego de Condiciones. Lo mismo ocurre con otros aspectos de ejecución como el vibrado o los encofrados. La inexistencia de elementos prefabricados impide añadir puntos en este sentido. No se cuenta tampoco con recubrimientos superiores a los establecidos por la Instrucción. La función de valor adoptada para este indicador (Capítulo 10, Figura F10.19) requiere un alto nivel de cumplimiento, en aras de incentivar prácticas que tienen una gran relevancia en la durabilidad. La baja puntuación obtenida se convierte, por medio de dicha función, en un coeficiente de valor nulo.

El indicador V4 se ocupa de la protección superficial del hormigón. En este caso no ha sido contemplada, motivo por el que adopta también un valor nulo.

En V5 se valora la protección adicional de las armaduras, un aspecto aplicable en especial a las estructuras situadas en ambientes de elevada agresividad. No siendo el caso, la no adopción de medidas en este sentido va correspondida (para la clase IIa) de una puntuación elevada, para evitar una penalización no oportuna.

Por último, V6 es un indicador relacionado con la evaluación, mediciones y control de la durabilidad. En la estructura analizada sí se realiza lo primero, adjuntando al proyecto una comprobación de que se cubren, como mínimo, los 50 años indicados como vida útil, en base al modelo de corrosión de armaduras propuesto por el Anejo 9 de la EHE-08. Este aspecto resulta suficiente para obtener una puntuación elevada, aunque no se realicen otro tipo de comprobaciones.

Las tablas T11.2 y T11.3 resumen los resultados obtenidos en la evaluación de los indicadores anteriores.

Indicadores Económicos	Coefficiente de valor
Indicador E1 – Análisis de costes	$V^E_1 = 0,66$
Indicador E2 – Análisis de funcionalidad	$V^E_2 = 0,61$

Tabla T11.2.- Coeficientes de valor (índices de satisfacción) obtenidos para los indicadores económicos.

Indicadores de Durabilidad	Coefficiente de valor
Indicador V1 – Soluciones de diseño	$V^V_1 = 0,40$
Indicador V2 – Dosificación del hormigón	$V^V_2 = 0,23$
Indicador V3 – Ejecución del hormigón	$V^V_3 = 0,00$
Indicador V4 – Protección superficial	$V^V_4 = 0,00$
Indicador V5 – Protección de las armaduras	$V^V_5 = 0,71$
Indicador V6 – Evaluación, mediciones y control de la durabilidad	$V^V_6 = 0,99$

Tabla T11.3.- Coeficientes de valor (índices de satisfacción) obtenidos para los indicadores de durabilidad.

Para obtener el Índice de Extensión de la Vida Útil (IEVU) se multiplican los resultados recogidos en la Tabla T11.3 por los coeficientes de ponderación de la Tabla T10.21 del Capítulo 10, de acuerdo con la expresión [E10.26] de aquel capítulo. Con ello se obtiene un IEVU de 0,39.

Introduciendo este valor del IEVU, los parámetros $c = 1$ y $POP = 0,20$, los resultados de la Tabla T11.2 y los coeficientes de la Tabla T10.13 del capítulo anterior en las expresiones E10.16 y E10.17 de dicho capítulo, se obtiene un Índice de Durabilidad (ID) de 0,31 y un Índice de Sensibilidad Económica (ISE) de 0,42.

11.3.4. Índice de Sensibilidad Social (ISS).

Este índice es el que requiere del manejo de un mayor volumen de información para su determinación (la mayor parte de ella se indica en 11.2.3) y el desarrollo de un procedimiento más laborioso, debido a que es necesario evaluar seis índices para cada uno de los siete grupos de empresas de empresas implicados (véase el Capítulo 10, epígrafe 10.5). Se generan de este modo 42 tablas análogas a la mostrada en F11.2, a las que se añade una última tabla, correspondiente al séptimo indicador (declaración de interés público), único para el conjunto de la estructura.

El indicador S1 es el relativo al empleo, y también el más valorado por el índice. No mide el volumen de mano de obra generado, sino su calidad y distribución. En 11.2.3 se indican las proporciones de empleo temporal y empleo femenino para cada empresa implicada, que en este caso son dos plantas cementeras, una planta siderúrgica, dos canteras, dos plantas de hormigón preparado, una planta de ferralla y una empresa constructora. En 11.2.3 se indican las empresas que participan en programas de integración laboral, aportan retribuciones complementarias o han implantado programas de conciliación familiar. La función de valor elegida plantea un alto nivel de exigencia, en vista de la relevancia social de este indicador; esta circunstancia se traduce en la obtención de bajas puntuaciones en la mayoría de los casos. Para la empresa constructora, sector en el que abundan los empleos temporales, debido a sus características, el coeficiente de valor alcanzado es nulo.

De forma complementaria al anterior, en S2 se valora la cualificación de las plantillas de las empresas y el esfuerzo realizado por las mismas en su formación. Se observa mayor nivel formativo en las industrias de mayor tamaño (producción de cemento y acero). En empresas muy pequeñas (por ejemplo, una planta de hormigón con dos empleados) este índice y el anterior pueden variar muy significativamente cuando se produce la sustitución de un trabajador por otro con diferentes condiciones.

En el indicador S3 se presta atención a los aspectos relacionados con la prevención de riesgos laborales. En el caso planteado las dos plantas cementeras, la planta siderúrgica, una cantera y la planta de ferralla tienen certificados sus sistemas de gestión de PRL según OSHAS 18000. Únicamente en estos casos existe constancia de sus índices de incidencia de accidentes laborales, que resultan inferiores a los valores medios en sus sectores respectivos (salvo en el caso de la ferralla) y por ello reciben una puntuación positiva proporcional a dicha reducción. Las instalaciones no certificadas no aportan dichos índices, por lo que no es posible asignarles puntuación en dicho sentido.

El indicador S4 está relacionado con la participación de las empresas en proyectos de investigación, aspecto que se concentra en las plantas de cemento y acero, debido a su tamaño, complejidad e integración en grupos industriales. No obstante, se han considerado también colaboraciones por parte de la planta de ferralla. Para los restantes elementos adopta un valor nulo.

El indicador S5 valora el origen próximo de los suministros y subcontrataciones de cada empresa o grupo de empresas, siendo en cierto modo la correspondencia social al indicador M8 de impacto ambiental del transporte. En 11.2.3 se detallan, para cada una de las empresas que intervienen en el proceso, las proporciones de materiales y mano de obra que proceden de cada uno de los tres ámbitos geográficos establecidos. En gran parte de los casos, la mayoría de las contrataciones y adquisiciones se reparten entre el entorno más próximo (la propia provincia y las limítrofes) y, en segundo lugar, el resto del territorio nacional. Puede destacarse el caso de la planta siderúrgica, en la que una porción importante de la chatarra empleada como materia prima procede de fuera de la Unión Europea. Adicionalmente a la merma de puntuación que ello supone, se añade la inexistencia de una certificación que acredite el origen responsable o sostenible de dicho material, por lo que la variable λ_{53}^S adopta un valor nulo. En los restantes casos no existen suministros exteriores a la UE, por lo que dicha variable adopta siempre su valor máximo. En general, los coeficientes de valor alcanzados en este indicador son altos, llegando al valor máximo en el caso de las canteras y de la empresa constructora.

Con el indicador S6 se pretende evaluar la implicación social de las empresas, así como su transparencia y política de comunicación. La elaboración de memorias de Responsabilidad Social es, como otros aspectos, más propia de las empresas de mayor tamaño. En cambio la participación en actividades sociales, deportivas, culturales, etc. no es ajena tampoco a las empresas más pequeñas, y en este aspecto casi todas obtienen puntuación (salvo una cantera y las plantas de hormigón).

Finalmente, el indicador S7 es único para la obra, y en este caso adopta el valor nulo, al no existir la declaración de obra de interés general.

La Tabla T11.4 recopila los resultados obtenidos, separados en función del grupo al que pertenece cada empresa, con $\bar{\delta}_j$ según la Tabla T10.28 del Capítulo 10. No se representa la columna $\bar{\delta}_7$, ya que correspondería a la planta de prefabricación, inexistente en el caso analizado.

Indicadores Sociales	Coeficiente de valor					
	$\bar{\delta}_1$	$\bar{\delta}_2$	$\bar{\delta}_3$	$\bar{\delta}_4$	$\bar{\delta}_5$	$\bar{\delta}_6$
Indicador S1 – Aspectos sociales del empleo	$V_{11}^S = 0,10$	$V_{12}^S = 0,56$	$V_{13}^S = 0,01$	$V_{14}^S = 0,01$	$V_{15}^S = 0,03$	$V_{16}^S = 0,00$
Indicador S2 – Aspectos sociales de la formación	$V_{22}^S = 0,84$	$V_{23}^S = 1,00$	$V_{24}^S = 0,30$	$V_{25}^S = 0,85$	$V_{26}^S = 0,59$	$V_{27}^S = 0,20$
Indicador S3 – Aspectos sociales de la prevención	$V_{33}^S = 0,59$	$V_{34}^S = 0,87$	$V_{35}^S = 0,33$	$V_{36}^S = 0,00$	$V_{37}^S = 0,36$	$V_{38}^S = 0,00$
Indicador S4 – Contribución a la I+D+i	$V_{44}^S = 0,65$	$V_{45}^S = 0,94$	$V_{46}^S = 0,00$	$V_{47}^S = 0,00$	$V_{48}^S = 0,53$	$V_{49}^S = 0,00$
Indicador S5 – Generación de actividad local	$V_{55}^S = 0,93$	$V_{56}^S = 0,65$	$V_{57}^S = 1,00$	$V_{58}^S = 0,97$	$V_{59}^S = 0,78$	$V_{60}^S = 1,00$
Indicador S6 – Comportamiento en RSC	$V_{66}^S = 0,89$	$V_{67}^S = 0,87$	$V_{68}^S = 0,36$	$V_{69}^S = 0,00$	$V_{70}^S = 0,45$	$V_{71}^S = 0,69$
Indicador S7 – Declaración de interés general	$V_{77}^S = 0,00$					

Tabla T11.4.- Coeficientes de valor (índices de satisfacción) obtenidos para los indicadores sociales.

Para obtener el Índice de Sensibilidad Social (ISS) se multiplican los resultados recogidos en la Tabla T11.4 por los coeficientes de ponderación de las tablas T10.28 y T10.30 del Capítulo 10, de acuerdo con la expresión [E10.35] de aquel capítulo, tomando $\bar{\delta}_7=0$, al no haber prefabricación. Con ello se obtiene un ISS de 0,24.

11.3.5. Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES)

Los resultados obtenidos en los epígrafes anteriores para ISMA (0,39), ISE (0,42) e ISS (0,24) se introducen en la expresión [E10.2] del Capítulo 10, empleando los coeficientes de ponderación de la

Tabla T10.1 de aquel capítulo, obteniéndose un Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES) de 0,37.

Es un valor acorde con los resultados parciales, y que en este caso se aproxima al valor del ISMA, que es el componente que mayor peso tiene en el ICES. En los epígrafes siguientes se analizarán variantes sobre este caso base, determinando sus impactos sobre el ICES.

11.3.6. Indicadores Complementarios

En la parte final del capítulo anterior (epígrafe 10.6) se plantea un panel de indicadores complementarios que aportan una descripción cuantitativa, no adimensional, de los impactos de la estructura estudiada, en términos de sostenibilidad, de forma adicional a los índices adimensionales determinados anteriormente (ISMA, ISE, ISS, ICES). Este panel está compuesto por dos indicadores ambientales, de consumo energético y emisión de dióxido de carbono, dos indicadores económicos, de coste de inversión y coste anual equivalente, y un indicador social, de volumen de mano de obra generado. A continuación se estiman dichos indicadores para el caso práctico analizado.

Los indicadores ambientales se obtienen a partir del modelo propuesto en el Capítulo 7 (epígrafe 7.4). Los datos de entrada necesarios son la dosificación del hormigón empleado, cuantía de armado y distancias a recorrer en las diferentes etapas de transporte. En este sentido intervienen en la obra tres hormigones diferentes:

- HA-25 para la cimentación, proveniente de la planta de hormigón nº 1, con una cuantía de armado de 62,95 kg/m³.
- HA-25 para la solera, proveniente de la planta de hormigón nº 2, con una cuantía de armado de 24,83 kg/m³.
- HA-40 para pilares y vigas, proveniente de la planta de hormigón nº 1, con una cuantía de armado de 120 kg/m³.

Se ha indicado que en las dos plantas de hormigón que suministran a la obra se utiliza cemento del tipo CEM-I. Por este motivo se utilizan los factores determinados en el epígrafe 9.3.2 del Capítulo 9 para este tipo de cemento: respectivamente, 4,92 GJ/t y 0,916 tCO₂/t. La Tabla T11.5 agrupa las variables correspondientes a los tres casos y los resultados de los cálculos.

Variable	HA-25 (cimentación)	HA-25 (solera)	HA-40 (pilares)
Cantidad cemento (kg/m ³)	316,7	316,7	422,2
Cantidad árido (kg/m ³)	1942	1942	1851,8
Cantidad aditivo (kg/m ³)	5	5	5
Relación a/c	0,6	0,6	0,45
Cuantía armado (kg/m ³)	62,95	24,83	120
Distancia cemento - planta (km)	200	400	200
Distancia áridos - planta (km)	15	5	15
Distancia aditivos - planta (km)	300	300	300
Distancia acero - ferralla (km)	1000	1000	1000
Distancia ferralla - obra (km)	40	40	40
Distancia planta - obra (km)	30	15	30
Volumen hormigón en obra (m ³)	85,66	171,83	27,51
Resultados			
Consumo total de energía primaria (MJ)	229.036,85	383.072,65	107.342,64
Emisión total de CO ₂ (kg)	31.004,64	57.382,63	13.839,73

Tabla T11.5.- Análisis de consumo energético y emisiones de CO₂ de los hormigones usados en la obra.

El coste de inversión correspondiente a la estructura se toma del propio proyecto de ejecución, contabilizando únicamente las partidas correspondientes a la misma. Dichas partidas expresan importes de ejecución material, a los que es necesario añadir los gastos generales (+13%), beneficio industrial (+6%) e IVA (+21%). Adicionalmente se deberían contabilizar los costes correspondientes a la redacción del proyecto y a la dirección de obra y coordinación de seguridad y salud, que se pueden estimar en un 3% cada uno, en base a la Tabla T8.1 (Capítulo 8), así como los atribuibles al control de calidad que, a falta de información específica, se estimarán en un 1%. Para realizar una estimación de coste anual equivalente se asume como periodo de servicio los 50 años estipulados en 11.2.2, determinándose los costes de mantenimiento por medio de los factores incluidos en la Tabla T8.4 del Capítulo 8. No se contabilizan los costes asociados a las posibles reparaciones de la estructura, considerados en la ecuación [E8.2] de dicho capítulo, pero de difícil determinación a priori. Por simplicidad, se omite también considerar una tasa de interés. Se presentan los resultados obtenidos en la Tabla T11.6, expresando todos los costes con IVA incluido.

Variable	Cimentación	Solera	Pilares
Coste de construcción (€)	39.350,16	38.633,87	17.119,84
Coste mantenimiento e inspección (€/año)	55,38	407,20	92,41
Coste de redacción de proyecto (€)	2.397,58		
Coste de la dirección facultativa (€)	4.795,15		
Coste del control de calidad (€)	951,04		
Resultados			
Coste de inversión inicial (€)	103.247,65		
Coste anual equivalente en 50 años (€/año)	2.619,94		

Tabla T11.6.- Análisis de costes en la construcción y mantenimiento de la estructura.

El volumen de mano de obra generado se obtiene aplicando el modelo propuesto en el Capítulo 8 (epígrafe 8.4.4), y en particular la Tabla T8.16 de dicho capítulo, que detalla la repercusión sobre la generación de trabajo de los diferentes procesos necesarios para la construcción de la estructura. Al

igual que para los factores ambientales, es necesario desglosar los tres tipos de hormigón diferentes que se utilizan en la obra. Se presentan los resultados en la Tabla T11.7.

Variable	HA-25 (cimentación)	HA-25 (solera)	HA-40 (pilares)
Cantidad cemento (kg/m3)	316,7	316,7	422,2
Cantidad árido (kg/m3)	1942	1942	1851,8
Cantidad aditivo (kg/m3)	5	5	5
Relación A/C	0,6	0,6	0,45
Cuantía armado (kg/m3)	62,95	24,83	120
Distancia cemento - planta (km)	200	400	200
Distancia áridos - planta (km)	15	5	15
Distancia aditivos - planta (km)	300	300	300
Distancia acero - ferralla (km)	1000	1000	1000
Distancia ferralla – obra (km)	40	40	40
Distancia planta - obra (km)	30	15	30
Volumen hormigón en obra (m3)	85,66	171,83	27,51
Resultados			
Volumen de mano de obra (horas)	346,84	524,08	154,96

Tabla T11.7: Análisis de la generación de empleo en la construcción de la estructura.

La combinación de las tres tablas anteriores permite obtener el panel de indicadores complementarios, que conforma la Tabla T11.8.

Indicador	Valor
Consumo de energía primaria (GJ)	719,45
Emisión de CO2 (t)	102,23
Coste de inversión inicial (€)	103.247,65
Coste anual equivalente (€/año)	2.619,94
Generación de empleo (horas)	1.025,88

Tabla T11.8: Panel de indicadores complementarios para la estructura estudiada.

11.4. ESTUDIO DE VARIANTES

11.4.1. Introducción.

Se ha determinado el Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad para el caso base planteado en 11.2, obteniéndose un resultado de ICES = 0,39, bastante bajo. El interés de haber planteado, deliberadamente, una opción orientada a un modesto cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad reside en la posibilidad de analizar ahora su mejora ante la introducción de variantes en el planteamiento inicial. De esta forma se contemplan cuatro posibles escenarios alternativos, para los que cabe esperar una mejora del ICES:

- Variante 1. Empleo de cemento de reducido impacto ambiental, mediante la incorporación de adiciones a su dosificación y una sustitución relevante de combustible fósil por combustibles alternativos.
- Variante 2. Sustitución de pilares y vigas de arriostramiento ejecutados *in situ* por elementos prefabricados.
- Variante 3. Incorporación de otras mejoras que afectan a la definición del proyecto, al control de calidad en la ejecución y a las condiciones de las empresas involucradas.
- Variante 4. Combinación de las tres variantes anteriores, con prefabricación de elementos estructurales por encima de la cota del terreno, empleando cementos de bajo impacto ambiental y con las otras mejoras referidas.

11.4.2. Variante 1. Modificación del tipo de cemento.

Se ha analizado en los capítulos anteriores la gran importancia de la producción del cemento sobre la sostenibilidad del hormigón, en particular en lo relativo al impacto sobre el medio ambiente. El empleo de adiciones (de origen natural o subproductos industriales) como sustitutivos del clinker, junto con la utilización de combustibles alternativos en los hornos, son dos aspectos que pueden mejorar en gran medida el perfil ambiental del cemento. El caso práctico analizado en 11.3 fue planteado con la utilización de cemento sin adiciones (CEM I), procedente de dos fábricas distintas, de las cuales en una se utilizaba un 5% de biomasa como combustible, y en la otra únicamente combustible fósil.

Para mostrar la influencia de ambas variables, se plantea ahora repetir el estudio de la estructura anterior, introduciendo la modificación del tipo de cemento empleado. En este supuesto, las dos plantas de hormigón que suministran a la obra recibirán el cemento de la cementera nº 1, situada aproximadamente a 200 km de ambas. El cemento será ahora CEM II A-V, con un 16% de cenizas volantes; la cementera nº 1 empleará un 15% de biomasa en su producción, en lugar del 5% anterior, así como un 5% de aceites industriales usados. Los restantes parámetros indicados en 11.2 no sufren modificaciones.

Dentro del Índice de Sensibilidad Medioambiental, la utilización de CEM II A-V afecta principalmente a los indicadores M3 (Producción del cemento) y M4 (Caracterización del cemento).

En M3 se pasa a considerar únicamente un productor de cemento (la planta nº 1) y se mejora la puntuación λ_{32}^M , de empleo de combustibles renovables, que pasa de 8,33 a 25, al incrementarse el porcentaje de biomasa en los hornos del 5% al 15%. También mejora λ_{33}^M , de empleo de residuos industriales como combustibles, alcanzando un valor de 8,33 debido al empleo de un 5% de aceites usados. Con todo ello, el valor de este indicador pasa de 0,19 en el caso base a 0,93 en esta variante.

El indicador M4 se ciñe exclusivamente al empleo de adiciones, y en el caso base su valor era nulo, al emplear exclusivamente cemento del tipo CEM I. En esta variante se emplea un 16% de cenizas volantes en sustitución de clinker, que permiten que el valor del indicador pase a ser 0,47.

Adicionalmente, el considerar una única planta suministradora de cemento, en este caso la más cercana a las plantas de hormigón, afecta ligeramente al indicador M8. Por efecto de la distancia de transporte, más reducida en esta planta que en la cementera nº 2, el indicador pasa de un valor 0,66 a 0,73. La Tabla T11.9 recopila los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores Medioambientales	Coficiente de valor
Indicador M1 – Optimización del consumo de materiales	$V_1^M = 0,51$
Indicador M2 – Sistemática del control de ejecución	$V_2^M = 0,86$
Indicador M3 – Producción del cemento	$V_3^M = 0,93$
Indicador M4 – Caracterización del cemento	$V_4^M = 0,47$
Indicador M5 – Producción del acero	$V_5^M = 0,99$
Indicador M6 – Caracterización de las armaduras	$V_6^M = 0,51$
Indicador M7 – Producción de áridos	$V_7^M = 0,07$
Indicador M8 – Impacto de los procesos de transporte	$V_8^M = 0,73$
Indicador M9 – Impacto de los procesos de elaboración y ejecución	$V_9^M = 0,09$

Tabla T11.9.- Coeficientes de valor de los indicadores ambientales, en la Variante 1, con empleo de CEM II A-V.

En conjunto, el ISMA ha pasado de 0,39 a 0,71, con un incremento del orden del 82%.

En el Índice de Sensibilidad Económica, las alteraciones provocadas por esta variante se circunscriben únicamente al IEVU, en particular al indicador V2 (Dosificación del hormigón). El empleo de adiciones se considera también una ventaja en cuanto a durabilidad, correspondiendo al CEM II A-V en clase de exposición IIa una puntuación $\lambda_{23}^V=15$, anteriormente nula. Con ello el indicador V2 pasa 0,23 a 0,39. La Tabla T11.10 recopila los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores de Durabilidad	Coficiente de valor
Indicador V1 – Soluciones de diseño	$V_1^V = 0,40$
Indicador V2 – Dosificación del hormigón	$V_2^V = 0,39$
Indicador V3 – Ejecución del hormigón	$V_3^V = 0,00$
Indicador V4 – Protección superficial	$V_4^V = 0,00$
Indicador V5 – Protección de las armaduras	$V_5^V = 0,71$
Indicador V6 – Evaluación, mediciones y control de la durabilidad	$V_6^V = 0,99$

Tabla T11.10.- Coeficientes de valor los indicadores de durabilidad, en la Variante 1, con empleo de CEM II A-V.

El IEVU pasa a adoptar un valor de 0,41, frente al 0,39 que alcanzaba en el caso base. El ISE queda en 0,44, ligeramente por encima del valor base (0,42).

Por último, en el Índice de Sensibilidad Social las únicas modificaciones son las debidas a considerar únicamente una planta productora de cemento en lugar de dos; la nº 1 presentaba un mejor comportamiento que la segunda en casi todos los indicadores y ahora dicha mejora se traslada a los valores de los indicadores; concretamente a S1, que se duplica aunque sigue en valores muy bajos, a S3 y a S4; en cambio, se produce una ligera disminución en S6, indicador en el que la cementera nº2 estaba mejor posicionada. No obstante, estas variaciones son amortiguadas por el bajo coeficiente de ponderación que afecta a las instalaciones de producción de cemento, y el valor global del ISS se incrementa en menos de una centésima, pasando del anterior 0,24 al 0,25. La Tabla T11.11 recopila los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores Sociales	Coeficiente de valor					
	$\bar{\delta}_1$	$\bar{\delta}_2$	$\bar{\delta}_3$	$\bar{\delta}_4$	$\bar{\delta}_5$	$\bar{\delta}_6$
Indicador S1 – Aspectos sociales del empleo	$V^S_1 = 0,20$	$V^S_1 = 0,56$	$V^S_1 = 0,01$	$V^S_1 = 0,01$	$V^S_1 = 0,03$	$V^S_1 = 0,00$
Indicador S2 – Aspectos sociales de la formación	$V^S_2 = 0,88$	$V^S_2 = 1,00$	$V^S_2 = 0,30$	$V^S_2 = 0,85$	$V^S_2 = 0,59$	$V^S_2 = 0,20$
Indicador S3 – Aspectos sociales de la prevención	$V^S_3 = 0,75$	$V^S_3 = 0,87$	$V^S_3 = 0,33$	$V^S_3 = 0,00$	$V^S_3 = 0,36$	$V^S_3 = 0,00$
Indicador S4 – Contribución a la I+D+i	$V^S_4 = 0,89$	$V^S_4 = 0,94$	$V^S_4 = 0,00$	$V^S_4 = 0,00$	$V^S_4 = 0,53$	$V^S_4 = 0,00$
Indicador S5 – Generación de actividad local	$V^S_5 = 0,95$	$V^S_5 = 0,65$	$V^S_5 = 1,00$	$V^S_5 = 0,97$	$V^S_5 = 0,78$	$V^S_5 = 1,00$
Indicador S6 – Comportamiento en RSC	$V^S_6 = 0,79$	$V^S_6 = 0,87$	$V^S_6 = 0,36$	$V^S_6 = 0,00$	$V^S_6 = 0,45$	$V^S_6 = 0,69$
Indicador S7 – Declaración de interés general	$V^S_7 = 0,00$					

Tabla T11.11.- Coeficientes de valor los indicadores sociales, en la Variante 1, con empleo de CEM II A-V.

En conjunto, el ICES alcanza un valor de 0,53, incrementándose un 35% con respecto al caso base, en que valía 0,39. Como se ha podido comprobar, este incremento se debe principalmente a la mejora del comportamiento ambiental, por medio del incremento del valor del ISMA.

Esta reducción en el impacto ambiental de la estructura puede verse reflejada en los indicadores complementarios correspondientes. El cemento empleado coincide con uno de los analizados en el epígrafe 9.3.2 del Capítulo 9 (tablas T9.7, T9.9), y presenta un consumo energético de 3,92 GJ/t y una emisión de CO₂ de 0,676 tCO₂/t.

Variable	HA-25 (cimentación)	HA-25 (solera)	HA-40 (pilares)
Consumo total de energía primaria (MJ)	201.826,95	328.490,85	95.693,26
Emisión total de CO ₂ (kg)	24.493,62	44.323,55	11.052,14

Tabla T11.12: Análisis del consumo energético y emisiones de CO₂ en los hormigones usados en la obra, en la Variante 1, con empleo de CEM II A-V.

La Tabla T11.12 contiene los resultados parciales del cálculo. Sumándolos se observa que el consumo total de energía primaria asciende a 626,01 GJ, un 13% menos que en el caso base, contabilizándose la emisión de 79,87 t de CO₂, lo cual supone una disminución del 21,9% con respecto al valor base.

11.4.3. Variante 2. Empleo de elementos prefabricados.

Se plantea ahora la utilización de vigas de arriostramiento y pilares prefabricados en una instalación externa, en lugar de los ejecutados *in situ*. La prefabricación tiene una consideración positiva en el modelo de evaluación, debido a que permite ejecutar las piezas de hormigón con mayor calidad que en obra, lo que redundará en una mejora de su durabilidad. También se considera positivo desde el punto de vista ambiental, por motivos parecidos.

En este caso, el volumen de elementos prefabricados se ciñe a los pilares y vigas (no tiene sentido prefabricar la solera o la cimentación) y asciende a un 9,7% del total, por lo que los posibles efectos positivos sobre los indicadores quedarán considerablemente amortiguados en la ponderación.

Se considera la ejecución en planta de los elementos mencionados, con hormigón HA-40 de relación a/c = 0,44 y dosificación 435 kg cemento / m³, 554 kg árido fino / m³, 1219 kg árido grueso / m³, 192 kg agua / m³. El cemento empleado es del tipo CEM I, procedente de la planta cementera nº 1. En la ejecución se emplean armaduras certificadas, todas ellas elaboradas de acuerdo a norma UNE, con uniones soldadas; se emplean recubrimientos un 10% superiores a los mínimos indicados por EHE-08; el curado se realiza mediante sistemas controlados y de alta eficacia, y se prolonga todo el tiempo necesario hasta alcanzar la resistencia característica; se incluyen dentro de sus pruebas de calidad la realización de ensayos relacionados con la durabilidad. La planta prefabricadora se encuentra en el entorno de la obra, aproximadamente a 40 km, distando 180 km de la cementera, 35 km de la cantera nº 1, de la que recibe el árido, y 1000 km de la planta siderúrgica que proporciona el acero (la misma que en los restantes casos). La planta cuenta con certificaciones ISO 14001 y OSHAS 18000, dispone de sistema de reciclado de agua de proceso, recicla el 75% de sus residuos y ha registrado un índice de incidencia de accidentes laborales un 35% inferior a la media de su sector. El 20% de los empleados de la planta dispone de contrato temporal, el 15% son mujeres, el 60% pueden considerarse trabajadores cualificados contratados de modo acorde a su titulación. La empresa participa en un programa de integración de discapacitados, al que aporta aproximadamente un 0,5% anual de su facturación; dispone de un plan de conciliación laboral – familiar, y cada empleado recibe una media de 12 horas de formación al año. El 65% de los suministros y el 90% de las subcontrataciones tienen su origen en la propia provincia o en provincias limítrofes, siendo de origen nacional los porcentajes restantes. La empresa participa en un proyecto de investigación, colabora con una fundación social y mantiene una página web actualizada y relativa a su actividad productiva y comercial.

La inclusión de elementos prefabricados implica ya una mejora en la puntuación del indicador M1 (optimización del consumo de materiales), aunque en este caso dicho incremento es pequeño (2,42 puntos adicionales, que incrementan el valor del indicador de 0,51 a 0,54) debido al bajo porcentaje de la prefabricación. Los indicadores M2, M3, M4, M5 y M7 no sufren variaciones frente a los correspondientes al caso base. En M6 (caracterización de las armaduras) la planta de prefabricación asume el papel de la instalación de ferralla en la parte del acero que le corresponde, y mejora su puntuación gracias al empleo de armaduras completamente elaboradas según formas normalizadas (traduciéndose en un incremento de valor del indicador de 0,51 a 0,53). El indicador M8 (impacto de los procesos de transporte) incluye las características de la planta de prefabricación, en este caso próxima a la obra, aunque su valor apenas se modifica con respecto al caso base (sigue en 0,66). El indicador M9 se refiere al impacto del procesado y ejecución, y en él la planta de prefabricación sustituye, para el 9,7% del hormigón que le corresponde, a la ferralla y a la planta de hormigón. Este indicador mejora el anterior valor, pasando a 0,15. La Tabla T11.13 recopila los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores Medioambientales	Coefficiente de valor
Indicador M1 – Optimización del consumo de materiales	$V^M_1 = 0,54$
Indicador M2 – Sistemática del control de ejecución	$V^M_2 = 0,86$
Indicador M3 – Producción del cemento	$V^M_3 = 0,19$
Indicador M4 – Caracterización del cemento	$V^M_4 = 0,00$
Indicador M5 – Producción del acero	$V^M_5 = 0,99$
Indicador M6 – Caracterización de las armaduras	$V^M_6 = 0,53$
Indicador M7 – Producción de áridos	$V^M_7 = 0,07$
Indicador M8 – Impacto de los procesos de transporte	$V^M_8 = 0,66$
Indicador M9 – Impacto de los procesos de elaboración y ejecución	$V^M_9 = 0,15$

Tabla T11.13.- Coeficientes de valor de los indicadores ambientales, en la Variante 2, con pilares y vigas prefabricados.

En conjunto, las mejoras anteriores conducen a un ISMA = 0,40, frente al anterior 0,39. El incremento es de un 2,5%.

En la parte económica las modificaciones con respecto al caso base se encuentran en la evaluación de la durabilidad. No existe variación en el indicador V2 (dosificación del hormigón), a pesar de que la dosificación del hormigón prefabricado es diferente de la que correspondía al HA-40 ejecutado *in situ*, ya que las diferencias son tan ligeras que la nueva dosificación queda dentro de los mismos valores que la antigua. El indicador V3, relativo a la ejecución, sí cambia con respecto al anterior, ya que los elementos prefabricados incluyen un curado prolongado y de alta eficacia y un incremento de los recubrimientos. No obstante, el bajo porcentaje de prefabricación hace que la buena puntuación correspondiente a este caso no se traduzca apenas en el valor del indicador, que pasa de 0,00 a 0,01. El mismo incremento se da en el indicador V6, de evaluación, mediciones y control de la durabilidad, en este caso en una situación diferente ya que la función de valor, muy exigente en V3, es ahora mucho más permisiva para incentivar la adopción de medidas de evaluación y control de la durabilidad. Este indicador pasa de 0,99 a 1,00. La Tabla T11.14 recopila los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores de Durabilidad	Coefficiente de valor
Indicador V1 – Soluciones de diseño	$V^V_1 = 0,71$
Indicador V2 – Dosificación del hormigón	$V^V_2 = 0,23$
Indicador V3 – Ejecución del hormigón	$V^V_3 = 0,01$
Indicador V4 – Protección superficial	$V^V_4 = 0,00$
Indicador V5 – Protección de las armaduras	$V^V_5 = 0,71$
Indicador V6 – Evaluación, mediciones y control de la durabilidad	$V^V_6 = 1,00$

Tabla T11.14.- Coeficientes de valor de los indicadores de durabilidad en la Variante 2, con pilares y vigas prefabricados.

Con todo ello, el IEVU apenas mejora, manteniendo su valor en 0,39, del mismo modo que el ISE continúa en 0,42.

Por último, en el índice social se introduce la evaluación de la planta de prefabricación (δ_7), ponderada con el porcentaje de elementos prefabricados presentes en la obra. Las características de esta planta permiten alcanzar buenos valores en los indicadores S2 (formación; $V^S_2 = 0,90$), S3 (PRL; $V^S_3 = 0,81$), S5 (actividad local; $V^S_5 = 0,97$) y S6 (RSC; $V^S_6 = 0,89$). Sin embargo, la distribución de los diferentes pesos de los indicadores hace que el ISS mantenga su valor de 0,24. La Tabla T11.15 recopila los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores Sociales	Coeficiente de valor						
	\bar{d}_1	\bar{d}_2	\bar{d}_3	\bar{d}_4	\bar{d}_5	\bar{d}_6	\bar{d}_7
Indicador S1 – Aspectos sociales del empleo	$V^s_1=0,10$	$V^s_1=0,56$	$V^s_1=0,01$	$V^s_1=0,01$	$V^s_1=0,03$	$V^s_1=0,00$	$V^s_1=0,33$
Indicador S2 – Aspectos sociales de la formación	$V^s_2=0,84$	$V^s_2=1,00$	$V^s_2=0,30$	$V^s_2=0,85$	$V^s_2=0,59$	$V^s_2=0,20$	$V^s_2=0,90$
Indicador S3 – Aspectos sociales de la prevención	$V^s_3=0,59$	$V^s_3=0,87$	$V^s_3=0,33$	$V^s_3=0,00$	$V^s_3=0,36$	$V^s_3=0,00$	$V^s_3=0,81$
Indicador S4 – Contribución a la I+D+i	$V^s_4=0,65$	$V^s_4=0,94$	$V^s_4=0,00$	$V^s_4=0,00$	$V^s_4=0,53$	$V^s_4=0,00$	$V^s_4=0,53$
Indicador S5 – Generación de actividad local	$V^s_5=0,93$	$V^s_5=0,65$	$V^s_5=1,00$	$V^s_5=0,97$	$V^s_5=0,78$	$V^s_5=1,00$	$V^s_5=0,97$
Indicador S6 – Comportamiento en RSC	$V^s_6=0,89$	$V^s_6=0,87$	$V^s_6=0,36$	$V^s_6=0,00$	$V^s_6=0,45$	$V^s_6=0,69$	$V^s_6=0,89$
Indicador S7 – Declaración de interés general				$V^s_7=0,00$			

Tabla T11.15.- Coeficientes de valor de los indicadores sociales en la Variante 2, con empleo de pilares y vigas prefabricados.

Globalmente, el ICES de este supuesto varía en menos de una centésima, y permanece en 0,37. El empleo de soluciones prefabricadas sí tiene incidencia positiva, aunque en este caso el porcentaje de elementos de este tipo es bajo, ya que no llega al 10% del total de hormigón estructural evaluado, y por ello la repercusión sobre el ICES es mínima.

11.4.4. Variante 3. Incorporación de otras mejoras diferentes a las anteriores.

Este supuesto pretende evaluar el efecto sobre el modelo de la introducción de varias modificaciones en las variables de entrada del caso base, que no alteran las características de la obra ni sus materiales. Se trata de aspectos relacionados con el alcance del proyecto / documentación final de obra, los ensayos de control de calidad realizados y el comportamiento en materia de sostenibilidad de las empresas implicadas en la obra.

En cuanto al proyecto, se contempla la inclusión de especificaciones detalladas en cuanto a procedimientos de encofrado y desencofrado, vibrado y curado del hormigón; se especifica que todas las armaduras deben de mantener continuidad eléctrica, lo cual se comprueba y certifica por parte de la dirección facultativa; el preceptivo estudio geotécnico incluye un análisis detallado del terreno y de los agentes químicos presentes en el mismo, que pudieran tener incidencia en la durabilidad de los elementos estructurales enterrados, no detectándose la necesidad de adoptar medidas especiales de protección; y se realiza un análisis de coste del ciclo de vida de la estructura, detallando los costes esperados de inspección y mantenimiento periódicos, así como el coste estimado del desmantelamiento final de la estructura, expresando dichos costes de acuerdo con la norma EN 15643-4:2012.

Durante la ejecución de la obra, y de acuerdo con la planificación incluida en el proyecto, se utilizan probetas cúbicas en todos los ensayos requeridos, en sustitución de las cilíndricas. Se realizan, además, ensayos relacionados con la durabilidad, como son los de permeabilidad y eficiencia del curado.

En lo referente a las condiciones de las empresas que intervienen en la obra, en este escenario las industrias de mayor tamaño (planta siderúrgica y fábricas de cemento) disponen de certificación EMAS, mientras que el resto de las empresas (canteras, plantas de hormigón, ferralla, empresa constructora) están certificadas ISO 14001. Asimismo, todas disponen de certificación OSHAS 18000. Por último, en todas las empresas el porcentaje de empleados temporales está por debajo del 25%, y todas mantienen canales de comunicación con el público en general, que dan transparencia a sus actividades.

En estas condiciones, los efectos de las variantes propuestas se reparten entre gran parte de los indicadores, tanto ambientales como económicos y sociales. El indicador M2 (control de ejecución) alcanza su valor máximo gracias al empleo de probetas cúbicas, mientras que la certificación EMAS de las plantas cementeras y siderúrgica mejora los indicadores M3 (producción del cemento) y M5 (producción del acero), y la certificación ISO 14001 de plantas de hormigón, canteras y empresa constructora afecta positivamente a los indicadores M7 (producción de áridos) y M9 (procesos de elaboración y ejecución). La Tabla T11.16 recopila los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores Medioambientales	Coefficiente de valor
Indicador M1 – Optimización del consumo de materiales	$V^M_1 = 0,51$
Indicador M2 – Sistemática del control de ejecución	$V^M_2 = 1,00$
Indicador M3 – Producción del cemento	$V^M_3 = 0,30$
Indicador M4 – Caracterización del cemento	$V^M_4 = 0,00$
Indicador M5 – Producción del acero	$V^M_5 = 1,00$
Indicador M6 – Caracterización de las armaduras	$V^M_6 = 0,51$
Indicador M7 – Producción de áridos	$V^M_7 = 0,23$
Indicador M8 – Impacto de los procesos de transporte	$V^M_8 = 0,66$
Indicador M9 – Impacto de los procesos de elaboración y ejecución	$V^M_9 = 0,28$

Tabla T11.16.- Coeficientes de valor obtenidos de los indicadores ambientales en la Variante 3, con la inclusión de otras mejoras.

La subida de los valores de los indicadores conduce también a un incremento del ISMA, que alcanza el valor de 0,44, frente al inicial de 0,39.

El indicador económico E1 (análisis de costes) alcanza su valor máximo, al incluirse en el proyecto un análisis de costes del ciclo de vida, que cubre todos los aspectos valorados. La Tabla T11.17 recopila los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores Económicos	Coefficiente de valor
Indicador E1 – Análisis de costes	$V^E_1 = 1,00$
Indicador E2 – Análisis de funcionalidad	$V^E_2 = 0,61$

Tabla T11.17.- Coeficientes de valor de los indicadores económicos en la Variante 3, con la inclusión de otras mejoras.

La mejora de las especificaciones de proyecto en cuanto a la verificación de la agresividad del suelo y a las condiciones de ejecución afecta a los indicadores de durabilidad V1 (soluciones de diseño) y V3 (ejecución del hormigón), mientras que la certificación de la continuidad eléctrica de las armaduras se refleja en el indicador V5 (protección de las armaduras) y la realización de ensayos relacionados con la durabilidad incrementa el valor del indicador V6 (evaluación, mediciones y control de la durabilidad) hasta su valor máximo. La Tabla T11.18 recopila los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores de Durabilidad	Coefficiente de valor
Indicador V1 – Soluciones de diseño	$V^V_1 = 0,66$
Indicador V2 – Dosificación del hormigón	$V^V_2 = 0,23$
Indicador V3 – Ejecución del hormigón	$V^V_3 = 0,02$
Indicador V4 – Protección superficial	$V^V_4 = 0,00$
Indicador V5 – Protección de las armaduras	$V^V_5 = 0,81$
Indicador V6 – Evaluación, mediciones y control de la durabilidad	$V^V_6 = 1,00$

Tabla T11.18.- Coeficientes de valor de los indicadores de durabilidad en la Variante 3, con la inclusión de otras mejoras.

El Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU) toma un valor de 0,49, y el Índice de Sensibilidad Económica (ISE) asciende a 0,54.

Finalmente, las mejoras propuestas en aspectos sociales afectan a los indicadores S1, por la mejora de la calidad del empleo, S3, por la certificación de los sistemas de gestión de PRL, y S6, por la generalización de la comunicación pública vía web y redes sociales. La Tabla T11.19 recopila los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores Sociales	Coeficiente de valor					
	$\bar{\delta}_1$	$\bar{\delta}_2$	$\bar{\delta}_3$	$\bar{\delta}_4$	$\bar{\delta}_5$	$\bar{\delta}_6$
Indicador S1 – Aspectos sociales del empleo	$V_{11}^S = 0,12$	$V_{12}^S = 0,56$	$V_{13}^S = 0,02$	$V_{14}^S = 0,04$	$V_{15}^S = 0,09$	$V_{16}^S = 0,03$
Indicador S2 – Aspectos sociales de la formación	$V_{21}^S = 0,84$	$V_{22}^S = 1,00$	$V_{23}^S = 0,30$	$V_{24}^S = 0,85$	$V_{25}^S = 0,59$	$V_{26}^S = 0,20$
Indicador S3 – Aspectos sociales de la prevención	$V_{31}^S = 0,59$	$V_{32}^S = 0,87$	$V_{33}^S = 0,47$	$V_{34}^S = 0,36$	$V_{35}^S = 0,36$	$V_{36}^S = 0,36$
Indicador S4 – Contribución a la I+D+i	$V_{41}^S = 0,65$	$V_{42}^S = 0,94$	$V_{43}^S = 0,00$	$V_{44}^S = 0,00$	$V_{45}^S = 0,53$	$V_{46}^S = 0,00$
Indicador S5 – Generación de actividad local	$V_{51}^S = 0,93$	$V_{52}^S = 0,65$	$V_{53}^S = 1,00$	$V_{54}^S = 0,97$	$V_{55}^S = 0,78$	$V_{56}^S = 1,00$
Indicador S6 – Comportamiento en RSC	$V_{61}^S = 0,97$	$V_{62}^S = 0,87$	$V_{63}^S = 0,60$	$V_{64}^S = 0,53$	$V_{65}^S = 0,64$	$V_{66}^S = 0,79$
Indicador S7 – Declaración de interés general	$V_{71}^S = 0,00$					

Tabla T11.19.- Coeficientes de valor de los indicadores sociales en la Variante 3, con la inclusión de otras mejoras.

El Índice de Sensibilidad Social (ISS) asciende hasta un valor de 0,28, y resulta un ICES de 0,44; esta variación supone un incremento del 12,8% sobre el caso base.

11.4.5. Variante 4. Escenario conjunto con aplicación de todas las variantes anteriores.

El último caso analizado será la aplicación simultánea de las tres variantes propuestas con anterioridad, teniendo en cuenta que ninguna de ellas es excluyente o incompatible con las demás. Se trata, por tanto, de considerar el empleo de cemento del tipo CEM II A-V, tanto en elementos ejecutados en obra (cimentación y solera) como en elementos prefabricados (pilares y vigas de arriostramiento), manteniendo las condiciones favorables en cuanto a proyecto, control de calidad e implicación de las empresas descritas en el tercer supuesto. Se presentan directamente las tablas de resultados de los indicadores, pero no se van a repetir aquí las explicaciones de las diferentes variantes anteriores. Las tablas T11.20 a T11.23 recopilan los coeficientes de valor obtenidos.

Indicadores Medioambientales	Coeficiente de valor
Indicador M1 – Optimización del consumo de materiales	$V_{11}^M = 0,55$
Indicador M2 – Sistemática del control de ejecución	$V_{21}^M = 1,00$
Indicador M3 – Producción del cemento	$V_{31}^M = 0,97$
Indicador M4 – Caracterización del cemento	$V_{41}^M = 0,47$
Indicador M5 – Producción del acero	$V_{51}^M = 1,00$
Indicador M6 – Caracterización de las armaduras	$V_{61}^M = 0,53$
Indicador M7 – Producción de áridos	$V_{71}^M = 0,23$
Indicador M8 – Impacto de los procesos de transporte	$V_{81}^M = 0,74$
Indicador M9 – Impacto de los procesos de elaboración y ejecución	$V_{91}^M = 0,36$

Tabla T11.20.- Coeficientes de valor de los indicadores ambientales, para el escenario conjunto (Variante 4).

Indicadores Económicos	Coeficiente de valor
Indicador E1 – Análisis de costes	$V_{11}^E = 1,00$
Indicador E2 – Análisis de funcionalidad	$V_{21}^E = 0,61$

Tabla T11.21.- Coeficientes de valor de los indicadores económicos, para el escenario conjunto (Variante 4).

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Indicadores de Durabilidad	Coefficiente de valor
Indicador V1 – Diseño orientado a la durabilidad	$V^V_1 = 0,66$
Indicador V2 – Dosificación del hormigón	$V^V_2 = 0,39$
Indicador V3 – Ejecución del hormigón	$V^V_3 = 0,05$
Indicador V4 – Protección superficial	$V^V_4 = 0,00$
Indicador V5 – Protección de las armaduras	$V^V_5 = 0,81$
Indicador V6 – Evaluación, mediciones y control de la durabilidad	$V^V_6 = 1,00$

Tabla T11.22: Coeficientes de valor de los indicadores de durabilidad, para el escenario conjunto (Variante 4).

Indicadores Sociales	Coefficiente de valor						
	$\bar{\delta}_1$	$\bar{\delta}_2$	$\bar{\delta}_3$	$\bar{\delta}_4$	$\bar{\delta}_5$	$\bar{\delta}_6$	$\bar{\delta}_7$
Indicador S1 – Aspectos sociales del empleo	$V^S_1=0,12$	$V^S_1=0,56$	$V^S_1=0,02$	$V^S_1=0,04$	$V^S_1=0,09$	$V^S_1=0,03$	$V^S_1=0,56$
Indicador S2 – Aspectos sociales de la formación	$V^S_2=0,84$	$V^S_2=1,00$	$V^S_2=0,30$	$V^S_2=0,85$	$V^S_2=0,59$	$V^S_2=0,20$	$V^S_2=1,00$
Indicador S3 – Aspectos sociales de la prevención	$V^S_3=0,59$	$V^S_3=0,87$	$V^S_3=0,47$	$V^S_3=0,36$	$V^S_3=0,36$	$V^S_3=0,36$	$V^S_3=0,87$
Indicador S4 – Contribución a la I+D+i	$V^S_4=0,65$	$V^S_4=0,94$	$V^S_4=0,00$	$V^S_4=0,00$	$V^S_4=0,53$	$V^S_4=0,00$	$V^S_4=0,94$
Indicador S5 – Generación de actividad local	$V^S_5=0,93$	$V^S_5=0,65$	$V^S_5=1,00$	$V^S_5=0,97$	$V^S_5=0,78$	$V^S_5=1,00$	$V^S_5=0,65$
Indicador S6 – Comportamiento en RSC	$V^S_6=0,89$	$V^S_6=0,87$	$V^S_6=0,60$	$V^S_6=0,53$	$V^S_6=0,64$	$V^S_6=0,79$	$V^S_6=0,89$
Indicador S7 – Declaración de interés general	$V^S_7 = 0,00$						

Tabla T11.23.- Coeficientes de valor de los indicadores sociales, para el escenario conjunto (Variante 4).

En esta situación se obtienen, como es de esperar, los valores más elevados de los diferentes índices: ISMA = 0,75 ISE = 0,55; ISS = 0,28; ICES = 0,59.

La Tabla T11.24 presenta los índices correspondientes al caso base y a las cuatro variantes presentadas, indicando entre paréntesis las variaciones del índice sobre los valores correspondientes al caso base.

Índice	Caso base	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
ISMA	0,39	0,71 (+82,0%)	0,40 (+2,5%)	0,44 (+12,8%)	0,75 (+92,3%)
ISE	0,42	0,44 (+4,8%)	0,42 (+0,0%)	0,54 (+28,6%)	0,55 (+30,9%)
ISS	0,24	0,25 (+4,2%)	0,24 (+0,0%)	0,28 (+16,7%)	0,28 (+16,7%)
ICES	0,37	0,53 (+43,2%)	0,37 (+0,0%)	0,44 (+18,9%)	0,59 (+59,5%)

Tabla T11.24: Resumen de resultados de este capítulo.

11.5. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.

En este capítulo se ha propuesto un caso base concreto de estructura de hormigón, al cual se ha aplicado el modelo del Capítulo 10. Tras ello se han planteado cuatro variantes de mejora a las cuales se ha vuelto a aplicar dicho modelo.

El estudio del caso base y sus variantes ha permitido exponer con mayor claridad el modo de empleo de los indicadores e índices en el Capítulo 10. Uno de los aspectos que queda patente es la cantidad y detalle de la información que hay que recopilar para la evaluación del ICES.

El caso base ha sido concebido para obtener valores bajos en los índices de sostenibilidad, de modo que quedase un cierto recorrido para la mejora con las variantes propuestas a continuación. En dichas variantes no se han introducido modificaciones de concepto en la estructura, sino que se han intentado plantear cambios relativamente sencillos, que muestran una mejora del comportamiento conjunto en materia de sostenibilidad.

La utilización de cementos con adiciones y producidos con mezclas de combustibles fósiles y alternativos implica una clara mejora en el comportamiento ambiental de la estructura, que puede ser comprobada mediante la determinación de los indicadores complementarios (consumo energético y emisiones de dióxido de carbono). Las otras dos variantes propuestas se traducen en incrementos más ligeros de los índices de sostenibilidad lo cual, por otra parte, es consecuente con los análisis realizados en capítulos anteriores de esta Tesis.

La situación más ventajosa se obtiene cuando se combinan las modificaciones introducidas en las tres primeras variantes, logrando incrementar el ICES en más de un 62%.

El modelo de evaluación de la sostenibilidad estructural desarrollado en la presente Tesis está formado por un número elevado de indicadores y variables, que obliga a la confluencia de medidas correctoras de tipo ambiental, económico y social para poder alcanzar un adecuado nivel de sostenibilidad. Se trata de un modelo exigente, debido a que ya hay cierto camino recorrido desde la EHE-08: con todas las mejoras introducidas no se ha podido superar un ICES de 0,6 sobre 1.

CAPÍTULO 12: CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS, CONCLUSIONES, APORTACIONES, LIMITACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

CAPÍTULO 12: CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS, CONCLUSIONES, APORTACIONES, LIMITACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.

12.1. INTRODUCCIÓN.

Este capítulo cierra la presente Tesis Doctoral, resumiendo sus conclusiones generales, planteando un escueto análisis crítico de la misma y proponiendo líneas de trabajo sobre las que desarrollar mejoras y evoluciones del modelo.

Se comienza por comprobar el cumplimiento de los objetivos planteados, junto con las conclusiones generales, destacando las ideas que quedan en primer plano, una vez completados el desarrollo y redacción de la Tesis. No se repetirán aquí las conclusiones particulares de cada capítulo, ya incluidas en los epígrafes finales correspondientes de los capítulos 4 a 11. Luego se justificarán brevemente las aportaciones originales efectuadas en la presente Tesis.

Tras ello sigue un epígrafe en el que se señalan los aspectos que han resultado más complejos de tratar, o que pueden suponer dificultades en la aplicación práctica de las propuestas realizadas en capítulos anteriores. Se deja así constancia del conocimiento de las debilidades del modelo, que constituyen posibles puntos de partida para nuevos desarrollos.

Por último, se plantean posibles trabajos futuros basados en el aquí presentado.

12.2. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS Y CONCLUSIONES GENERALES.

Los objetivos de esta Tesis fueron planteados en el Capítulo 1, epígrafe 1.2. Los dos primeros estaban relacionados con el análisis detallado del modelo de evaluación de la sostenibilidad en estructuras de hormigón ofrecido por el Anejo 13 de la EHE-08, en cuanto a la relevancia y completitud de los aspectos incluidos en el mismo. El tercer objetivo aspiraba al desarrollo de un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad.

En general, ha sido necesario partir de la búsqueda y revisión de abundante bibliografía relacionada con el hormigón, la sostenibilidad ambiental, social y económica y todas las interrelaciones entre ambos campos; también se han revisado varios trabajos previos específicamente relacionados con el desarrollo y análisis del propio Anejo 13.

El objetivo sobre la relevancia de los aspectos incluidos en el Anejo 13 y su correspondencia con los resultados de un análisis del ciclo de vida se ha tratado en los capítulos 4 a 7 y 9:

- Recurriendo al estudio de datos reales de producción, y al análisis de la información extraída de las fuentes consultadas, se ha elaborado un análisis de ciclo de vida del hormigón estructural, estableciendo sus principales impactos ambientales.
- Se ha procurado que dicho análisis sea lo más representativo de la realidad del sector del hormigón estructural en España, intercambiando para ello opiniones con varios profesionales del sector.
- Los resultados obtenidos están en consonancia con los de otros ACV realizados en los ámbitos nacional e internacional, y permiten la priorización de los componentes y procesos que más peso tienen en la contribución a la sostenibilidad de una estructura de hormigón.
- Fruto del ACV realizado, en el Capítulo 7 se ha establecido un modelo de cálculo de consumo energético y emisiones contaminantes. Este modelo puede ser usado para determinar el impacto ambiental de una estructura de hormigón concreta, como alternativa simplificada a la utilización de un software especializado u otras herramientas de mayor complejidad, que además suelen tener precios muy altos (las utilidades gratuitas no suelen aportar grandes capacidades de análisis).
- Como se señala en el Capítulo 9, tras contrastar los resultados del ACV de esta Tesis con el modelo de sostenibilidad de la EHE-08 y con el estudio de sensibilidad de dicho modelo, realizado por Mel et al. (2015), se han encontrado discordancias, constatándose que el modelo de la EHE no establece una importancia adecuada de cada uno de los diferentes aspectos de una estructura de hormigón relacionados con la sostenibilidad.
- En base a lo anterior, se ha establecido un orden de prioridades sobre el cual reordenar las ponderaciones de los aspectos ambientales, en el nuevo modelo de evaluación.

La completitud de los aspectos considerados por el Anejo 13 ha sido también objeto de estudio. Además de las implicaciones ambientales, ya aludidas, se ha profundizado en las componentes económica y social del sector del hormigón. Como parte del trabajo resumido en los capítulos 4 a 8,

se han identificado los aspectos que debe incluir un modelo de sostenibilidad, tanto en aspectos ambientales, como sociales y económicos. A su vez, en el Capítulo 9 se ha contrastado lo anterior con los aspectos recogidos en la EHE-08. Las principales conclusiones son:

- El Anejo 13 abarca los aspectos ambientales de mayor relevancia, si bien su priorización no coincide con las conclusiones del análisis de ciclo de vida, como ya se ha anticipado. Aun así, el nuevo modelo aquí presentado es más completo, y resuelve otros problemas del Anejo 13 diferentes de la ponderación.
- Por el contrario, en la EHE la vertiente económica de la sostenibilidad se aborda de una manera simplista, únicamente en base a único factor relacionado con la durabilidad, que además no siempre es coherente con un análisis de ciclo de vida económico. Por tanto, era más que necesario ampliar el análisis, introduciendo más aspectos económicos, como son el análisis de costes y de funcionalidades, y tratando la durabilidad en mayor profundidad.
- La profundización que se ha hecho en materia de durabilidad supone recorrer dos posibles caminos en la evaluación. Primeramente se necesita determinar el potencial periodo de servicio de la estructura, para verificar si realmente la durabilidad es un aspecto crítico, o si por el contrario es necesario orientar la evaluación hacia la aptitud de la estructura para su reutilización o traslado, en el caso de estructuras temporales o con misiones que apenas se dilatan en el tiempo. Por otra parte, la evaluación de la durabilidad debe atender a múltiples aspectos, en función de las características de la estructura y de la agresividad del medio en que se encuentre. Todo esto ha sido tenido en cuenta en el nuevo modelo aquí propuesto.
- Al igual que ocurre con lo económico, lo social también es abordados de un modo incompleto en el Anejo 13; ha sido necesario ampliar el número de parámetros a evaluar, y organizar sus ponderaciones en función de su relevancia.

El cumplimiento de los dos objetivos anteriores proporciona los argumentos de entrada necesarios para formular un nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón, tercer objetivo y núcleo de la Tesis que se presenta, y que ocupa el Capítulo 10:

- El modelo toma ciertas ideas básicas del Anejo 13, fundamentalmente el empleo del método MIVES de indicadores sencillos, diferentes de los de un ACV. Sin embargo, la estructuración es completamente diferente, con un árbol mucho más completo que calcula el Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES) a partir de tres índices parciales, ambiental, social y económico (ISMA, ISS, ISE). Recuérdese que el modelo de la EHE sólo empleaba MIVES para el ISMA; aquí se emplea en todo el modelo.
- Por tanto, se mantiene la idea de generar un modelo que, como ocurría con el de la EHE-08, sea relativamente sencillo de comprender por los técnicos no especializados en sostenibilidad, evitando el análisis de ciclo de vida.
- El Índice de Sensibilidad Medioambiental (ISMA) sigue una estructura parecida al de la EHE, e integra la gran mayoría de los aspectos en considerados en la Instrucción,

si bien su organización y priorización son diferentes y acordes a los resultados de un ACV.

- El Índice de Sensibilidad Económica (ISE) incluye, además de otros aspectos, el estudio de la durabilidad. Se introduce en este índice un parámetro que bifurca la evaluación en función de si la previsión de servicio de la estructura es temporal o permanente. En el primer caso se valora la aptitud de la misma para la reutilización o el desmontaje y traslado, y en el segundo se evalúan en detalle las características y medidas de protección que permitirán alargar su vida útil.
- El Índice de Sensibilidad Social (ISS) supone valorar, de forma sucesiva y ponderada, los aspectos sociales asociados al funcionamiento de cada empresa o grupo de empresas intervinientes en la creación de la estructura de hormigón y de sus componentes.
- Al igual que el ISMA, el ISE y el ISS, el Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES), es un valor adimensional comprendido entre 0 y 1, que da una idea del grado de sostenibilidad de una determinada solución estructural. Al fin y al cabo, aunque se empleen números, el ISMA, el ISE, el ISS y el ICES suponen una evaluación cualitativa.
- Adicionalmente al ICES, se ha generado un panel de indicadores complementarios que permiten expresar algunos de los parámetros relacionados con la sostenibilidad en términos cuantitativos, no adimensionales. Estos indicadores comprenden el consumo de energía primaria, las emisiones de dióxido de carbono, el coste de inversión, el coste anual equivalente y el volumen de mano de obra generado.
- Mediante su aplicación a un caso práctico base con diferentes variantes, en el Capítulo 11, se ha probado el funcionamiento del modelo y su sistema de evaluación. De acuerdo con el propio concepto de sostenibilidad, la naturaleza del modelo obliga a que la obtención de un ICES elevado necesite una actuación combinada en materia ambiental, social y económica. Apenas se consigue elevar el ICES si solamente se trata de potenciar una sola característica, o unas pocas.

Hasta aquí la justificación del cumplimiento de objetivos y el resumen de las conclusiones generales. Como se ha indicado con anterioridad, el lector puede encontrar las conclusiones particulares en el último epígrafe de los capítulos 4 a 11.

12.3. APORTACIONES ORIGINALES. PUBLICACIONES.

Al margen de realizar un análisis de conjunto más profundo sobre la sostenibilidad estructural que el que se hace en la literatura existente, más centrada en aspectos específicos de la misma, la principal aportación de esta Tesis Doctoral es el desarrollo del nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad para estructuras de hormigón, recogido en el Capítulo 10, que constituye una alternativa mucho más adecuada y completa que la de la EHE-08, y que puede emplearse en un marco normativo, o no.

También se han realizado otras aportaciones, como el análisis de ciclo de vida del hormigón que, siendo parecido a otros estudios de este tipo, presenta la peculiaridad de basarse directamente en datos correspondientes a empresas españolas, aportando datos sobre algunos indicadores que la literatura existente no recoge. Los capítulos 4 al 8 recogen los trabajos correspondientes a esta aportación.

Las herramientas y bases de datos comerciales actuales no permiten realizar análisis de ciclo de vida que incluyan indicadores medioambientales, sociales y económicos. El software existente permite generar cuantos indicadores se desee, en cualquiera de esos tres ámbitos, pero luego las bases de datos no tienen información más que sobre los aspectos ambientales, con lo cual el analista tiene que generar el indicador social o económico y luego buscar por su cuenta la información al respecto, que es lo que se ha hecho aquí. Esta es otra de las aportaciones de la Tesis.

Otra aportación es la que supone haber generado un modelo cualitativo basado en MIVES cuyos resultados son coherentes con los de un análisis de ciclo de vida.

Con todo lo anterior, el modelo presentado permite avanzar en la senda de la evaluación de la sostenibilidad estructural, campo en el que la EHE-08 fue una Instrucción pionera en el ámbito internacional.

La aplicación de este modelo podría resultar útil a diferentes partes implicadas en el sector:

- Los clientes pueden basarse en él para exigir, como una condición contractual, la obtención de un nivel mínimo de ICES. El modelo es perfectamente válido para servir de base a una certificación específica de cada obra.
- Los proyectistas y directores de obra pueden emplearlo como herramienta de ayuda en la toma de decisiones técnicas, como un argumento más con el que valorar las diferentes opciones posibles.
- Las empresas constructoras, suministradoras o fabricantes de componentes relacionados con las estructuras de hormigón pueden añadir a sus argumentos comerciales la adecuación de los servicios o productos ofertados a las exigencias de los diferentes indicadores del modelo, facilitando la mejora de la calificación obtenida.
- La Administración Pública puede introducir el ICES como criterio de selección de proyectos o empresas cuando actúa como promotora, o aplicarlo como criterio en la concesión de permisos o subvenciones, entre otros aspectos.

El Anejo 13 de la EHE-08 ya permitía estas posibilidades aunque, hasta donde se conoce, su utilización no se ha generalizado en los años que han transcurrido desde la entrada en vigor de la Instrucción; es difícil identificar con claridad las razones de ello, pero quizá una de peso es que el anejo no es de obligado cumplimiento. Establecer obligatoriedad debería ser buen, pero en un sector como el de la construcción, siempre va a contar con las reticencias e incluso con la oposición de algún sub-sector o de todo el sector. Alguien pudiera haber pensado que el nuevo Código Estructural español va a establecer la obligatoriedad de la evaluación de la sostenibilidad por medio del nuevo modelo que va a incluir (a cuyos borradores no ha sido posible acceder por deseo expreso del coordinador del grupo de trabajo), pero no parece que sea eso lo que va a suceder. Esto quiere decir que es muy probable que el sector siga sin aplicar este tipo de evaluaciones, salvo en el caso de empresas de cierto tamaño y prestigio. Cabe esperar que en el futuro sí se llegue a establecer esa obligatoriedad, aunque no sea incluyendo análisis de ciclo de vida, sino modelos como el aquí propuesto.

Debe reiterarse que, aunque se ha aludido repetidamente a la EHE-08 y su Anejo 13, el modelo presentado puede aplicarse en otros marcos normativos y, por tanto, en otros países. Con escasos cambios que no alterarían los resultados, de manera fácil y rápida, sería posible utilizarlo de forma independiente de la EHE, o adaptarlo a otro código estructural, incluidos los Eurocódigos o el nuevo Código Estructural español, que se va a basar ya plenamente en los Eurocódigos. En el Capítulo 10 existen alusiones a la EHE dentro de las tablas descriptoras de los indicadores, que pueden ser actualizadas para referirse a futuras normativas, sin apenas problemas.

Finalmente, con respecto a publicaciones, hasta ahora los trabajos esenciales desarrollados en el marco de esta Tesis han sido publicados en congresos y revistas indexadas JCR (Mel et al., 2013; 2014; 2014b; 2014c; 2014d; 2015), salvo el modelo del Capítulo 10, que se espera poder comunicar también por estos medios.

12.4. LIMITACIONES DEL MODELO.

El desarrollo del nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad y su comprobación mediante los casos prácticos del capítulo anterior han obligado al planteamiento de numerosas cuestiones relacionadas con su alcance, el significado de sus resultados y las posibles dificultades a la hora de aplicarlo en casos reales.

En el modelo propuesto se ha evitado la doble evaluación en al terminar las fases de proyecto y ejecución, contempladas en la EHE. La evaluación se realizará sobre el conjunto de la obra terminada dependiendo, en consecuencia, tanto de la planificación realizada en el proyecto técnico como de los posibles cambios registrados en obra con respecto a aquella planificación y, por tanto, de lo realmente ejecutado. Esto no es una limitación, porque no elimina la posibilidad de hacer estimaciones del ICES en cualquiera de las fases del proyecto, desde la de concepción hasta la de desmantelamiento.

Uno de los aspectos en los que se han detectado posibles problemas es en la disponibilidad de la información necesaria para alimentar el modelo, por lo menos en fases tempranas del proyecto. Como se ha mostrado en el Capítulo 11 (epígrafe 11.2), se necesita una gran cantidad de datos para poder evaluar correctamente los indicadores presentados en el Capítulo 10. Algunos de ellos, en particular los de carácter más técnico, pueden ser obtenidos directamente a partir del proyecto o de la documentación final de obra. Otros, como pueden ser los relativos a los aspectos sociales, pueden entrañar mayores dificultades. Los casos prácticos analizados en el Capítulo 11 incluían una gran cantidad de información relativa a las empresas que participan en la obra que posiblemente sea, en muchos casos, difícil de conseguir (temporalidad del empleo, volumen de empleo femenino, cualificación de sus trabajadores, etc.). Para algunas empresas, la difusión de determinados datos podría ser contraria a su política corporativa, mientras que otras podrían incluso desconocer parte de la información solicitada. Se plantea también una cuestión de carácter temporal, ya que por un lado se solicitan datos muy concretos que son difíciles de conocer antes de la fase de ejecución como, por ejemplo, el origen de los componentes del hormigón o la planta o plantas que suministrarán hormigón a la obra. Por otro lado, se considera que el nuevo modelo es una herramienta de decisión entre diferentes alternativas estructurales.

En resumen, al igual que sucedía con el modelo de la EHE (Gómez et al., 2013), con el análisis del ciclo de vida, y con la mayoría de modelos que estiman el valor futuro de un determinado parámetro, existe incertidumbre en cuanto al valor que pueden tomar algunas de las variables del modelo. Esta es una limitación, por tanto, compartida con cualquier otro modelo.

Ante este tipo de problemas debe recurrirse al sentido común para estimar los posibles valores máximos, mínimos y más frecuentes de cada variable, y emplear la simulación estocástica o la matemática difusa, respectivamente mediante los métodos MIVES – Monte Carlo (del Caño et al., 2012, Gómez et al., 2015, de la Cruz et al., 2015a) y MIVES difuso (de la Cruz et al., 2015b, del Caño et al., 2016, Quintela et al., 2016). En el primer caso se obtendrá una función de distribución de los posibles índices ambiental, social, económico y global de sostenibilidad (del Caño et al., 2012), y en el segundo un número difuso para cada uno de ellos (del Caño et al., 2016, Quintela et al., 2016).

El papel del evaluador puede ser también objeto de matizaciones. Como se ha indicado en el epígrafe anterior, esta función puede ser asumida por diferentes sujetos, y en función de los intereses a los

que cada uno represente, puede variarse el enfoque de la evaluación. Existen determinados aspectos en los que la decisión entre un valor o puntuación y otro puede ser relativamente subjetiva, circunstancia motivada, en parte, por la obligada amplitud del alcance del modelo, que debe de poder adaptarse a estructuras de muy diferente clase. No hay muchas variables afectadas por ello, pero las hay. Un ejemplo es la elección del valor de la Probabilidad de Obsolescencia Prematura (POP), cuya decisión final está en manos del evaluador, y pueden justificarse diferentes valores por circunstancias particulares de cada caso y de cada punto de vista. Otros casos parecidos pueden encontrarse en la evaluación de aspectos funcionales, como las consideraciones estéticas o el desempeño de funciones adicionales a la sustentación de cargas. Todo lo dicho supone, de nuevo, problemas que existen en la mayoría de modelos que estiman el valor futuro de un determinado parámetro, si bien en este caso la esencia del problema es la subjetividad o la vaguedad.

En realidad, no sólo puede haber diferentes puntos de vista o discrepancias en cuanto a las puntuaciones empleadas en las tablas del Capítulo 10, sino también con respecto a las ponderaciones empleadas en el árbol de requerimientos, o a la geometría de las funciones de valor. Este tipo de discrepancias, la subjetividad y la vaguedad pueden también tratarse de forma análoga a la incertidumbre, considerando como no deterministas las variables sometidas a los problemas aludidos, y empleando también el método MIVES – Monte Carlo, el método MIVES difuso.

Para terminar este epígrafe, se podría hacer una pregunta: ¿cómo sería una estructura con un alto valor de ICES?. En el caso base planteado en el Capítulo 11, sin especiales exigencias de sostenibilidad, se obtenía un ICES de 0,37. En la última de las variantes propuestas en dicho capítulo, que aglutinaba todas las mejoras propuestas en las diferentes variantes, se alcanzaba un ICES de 0,60. Ya se ha anticipado en el Capítulo 10 que, como no podía ser de otra manera, habiendo los problemas que hay ya en el planeta, y habiendo ya un modelo de sostenibilidad estructural desde el año 2008, el modelo aquí presentado es exigente. Tal y como se han planteado los indicadores, para que una estructura alcance valores sobresalientes en el ICES, próximos a 1, debería reunir características fuera de lo convencional en múltiples sentidos, y su excepcionalidad debe abarcar también a la cadena de valor existente tras la propia estructura. Es decir, que además de un diseño y ejecución expresamente volcados en la sostenibilidad, se necesitaría que los suministradores y contratistas implicados también registrasen un nivel de compromiso elevado en este sentido.

12.5. FUTUROS DESARROLLOS.

El modelo obtenido como resultado de esta Tesis es susceptible de posibles mejoras y ampliaciones, y puede servir de base para el desarrollo de futuros trabajos. Se citan brevemente algunas ideas para los mismos, derivadas de los trabajos realizados hasta la fecha.

- Del modo análogo al trabajo realizado por Gómez (2012) para el Anejo 13 de la EHE-08, un análisis de sensibilidad del modelo aquí propuesto, que identifique la influencia máxima de cada variable y los escenarios en que se produce la misma, podría ayudar a simplificar el modelo, eliminando las variables que realmente no influyan sobre los resultados del modelo, y sea oportuno eliminar.
- La utilización del modelo puede simplificarse mediante el desarrollo de una aplicación informática amigable, creada para ello. Dicha aplicación podría integrar también un módulo de análisis de ciclo de vida basado en los trabajos de esta Tesis, o soportar la importación de información de bases datos y software comerciales, facilitando la obtención de los indicadores cuantitativos complementarios que podrían ser ampliados, en función de las posibilidades de las bases de datos disponibles.
- El empleo del modelo en la evaluación de un número suficientemente abundante de supuestos o casos reales podría mejorar las apreciaciones en cuanto a dificultades, fallos o incongruencias en los planteamientos, y servir para la elaboración de un modelo mejorado. Uno de los aspectos que podría resultar interesante con vistas a su comprobación práctica, sería la identificación de interrelaciones entre indicadores. Por ejemplo, si se emplea un inhibidor de corrosión superficial, valorado en el indicador V4 (protección superficial del hormigón), no tendrá entonces objeto utilizar al mismo tiempo otro inhibidor incluido en la dosificación, que se valora en el indicador V2 (dosificación del hormigón). También existen aspectos en los que, lo que es bien valorado en cuanto a durabilidad, puede ser contraproducente en el sentido medioambiental, como es el caso del incremento del contenido en cemento o de los recubrimientos nominales. Algunas cosas como estas no se han considerado expresamente en el modelo, aunque se considera que este problema no lleva a evaluaciones inadecuadas.
- Por supuesto, las limitaciones previamente mencionadas, en cuanto a las posibles incertidumbre, subjetividad y vaguedad en la evaluación, y en lo relativo a la dificultad en la obtención de la información de partida, podrían también ser objeto de estudio y mejora.
- Cuando sea posible conocer el contenido del modelo de sostenibilidad del nuevo Código Estructural español, se podrán hacer comparaciones entre el modelo de esta Tesis y aquel, y entre aquel y un análisis del ciclo de vida.
- Finalmente, hay que trabajar ya en modelos de sostenibilidad basados en ACV, que sean fáciles usar por arquitectos e ingenieros con formación convencional, y que permitan la comparación entre estructuras de diferentes materiales para un mismo edificio o infraestructura. El grupo en el marco del cual se ha realizado esta Tesis ha comenzado ya a trabajar en este campo (Fernández Sela et al., 2016).

ANEJO 1: REFERENCIAS

ANEJO 1: REFERENCIAS

AB Ingeniería, 2011 – “Honorarios de Ingenieros”, AB Ingeniería Civil, España, 2011.

Acciaierie di Sicilia, 2011 – “Dichiarazione Ambientale di Prodotto per tondo in acciaio in barre e rotoli per calcestruzzo armato”, certificación ENVIRONDEC nº S-P-00255, Acciaierie di Sicilia, verificado por ICMQ SpA, Milano, 2011.

AENOR, 1997 – “Norma UNE 36831:1997 - Armaduras pasivas de acero para hormigón estructural. Corte, doblado y colocación de barras y mallas. Tolerancias. Formas preferentes de armado.” AENOR, Madrid, 1997.

AENOR, 2003 – “Norma UNE-EN 1990:2003 - Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras.” AENOR, Madrid, 2003.

AENOR, 2004 – “Norma UNE-EN ISO 14001:2004 - Sistemas de gestión medioambiental. Requisitos con orientación para su uso.” AENOR, Madrid, 2004.

AENOR, 2006 – “Norma UNE-EN ISO 14040:2006 – Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Marco de Referencia”. AENOR, Madrid, 2006.

AENOR, 2007 – “Estándar OSHAS 18001:2007 – Sistemas de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo”. AENOR, Madrid, 2007.

AENOR, 2012 – “Norma UNE-EN 15643-4:2012 - Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 4: Marco para la evaluación del comportamiento económico.”, AENOR, Madrid, 2012.

Aguado et al., 2008 – “Razón de ser del Anejo ICES de la EHE y características del mismo”, A. Aguado, B. Alarcón, R. Manga, Cemento y Hormigón, 913, pp.16-23, Ediciones Técnicas Pauta, 2008.

Al-Assadi et al., 2008 - “Influencia de las condiciones de curado en el comportamiento del hormigón sometido a ciclos de hielo – deshielo”, G. Al-Assadi, M. Casati, J. Fernández, J. Gálvez, Anales de Mecánica de la Fractura, 25(2), pp. 629-634, XXV Encuentro del Grupo Español de Fractura, 2008.

Alavedra y Cuerva, 2008 – “Aplicación del índice de sostenibilidad en la rehabilitación de un edificio industrial”, P. Alavedra, E. Cuerva, Cemento y Hormigón, 913, pp.82-91, Ediciones Técnicas Pauta, 2008.

Alcorn, 2003 – “Embodied energy and CO2 coefficients for NZ building materials”, A. Alcorn, Centre for Building Performance Research, Victoria University of Wellington, 2003.

Alfa Acciai, 2011 – “Dichiarazione Ambientale di Prodotto per tondo in acciaio in barre e rotoli per calcestruzzo armato”, certificación ENVIRONDEC nº S-P-00254, Alfa Acciai, verificado por ICMQ SpA, Milano, 2011.

Almusallam et al., 2003 - "Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability", A. Almusallam, F. Han, S. Dulaijan, O. Al-Amoudi, *Cement and Concrete Composites*, 25, pp. 473-481, Elsevier, 2003, doi: 10.106/ S0958-9465(02)00087-2.

Alonso et al., 2007 - "Corrosión y protección de las estructuras de hormigón armado", M. Alonso, M. Andrade, J. Fullea, Zuncho, 11 pp.11-19, *Calidad Siderúrgica*, 2007.

Al-Rabiah et al., 1990 - "Durability requirements for reinforced concrete construction in aggressive marine environments", A. Al-Rabiah, Rasheeduzzafar, R. Bagott, *Marine Structures*, 3, pp. 285-300, Elsevier, 1990.

ANDECE, 2016 – Comunicación mediante correo electrónico, Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón (ANDECE), Madrid, junio de 2016.

ANEFA, 2013 - "Qué son los Áridos", Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA), Madrid, www.aridos.org, accedido 07.10.2013.

ANEFA, 2013b - "Explotaciones de Áridos y Medio Ambiente", Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA), Madrid, www.aridos.org, accedido 07.10.2013.

ANEFHOP, 2013 – "Boletines Estadísticos Trimestrales", Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP), Madrid, www.anehop.com, accedido el 07.10.2013.

Aponte et al., 2012 - "Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes", D. Aponte, M. Barra, E. Vazquez, *Construction and Building Materials*, 30, pp. 537-546, Elsevier, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.026.

Armacon, 2016 – Visita a la planta de hormigón preparado de Armacon, S.L. en As Pontes (A Coruña), en abril de 2016.

Ashley y Lemay, 2008 – "Concrete's contribution to sustainable development", E. Ashley, L. Lemay, *The Journal of Green Building*, 3(4), pp.37-39, College Publishing, 2008.

Assefa et al., 2007 – "Environmental assessment of building properties - Where natural and social sciences meet: the case of Eco Effect", G. Assefa, M. Glaumann, T. Malmquist, B. Kindembe, M. Hult, U. Myhr, O. Eriksson, *Building and Environment*, 42 , pp. 1458-1464, Elsevier, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.12.011.

Babbitt y Lindner, 2005 - "A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida", C. Babbitt, A. Lindner, *Journal of Cleaner Production*, 13, pp. 903-912, Elsevier, 2005, doi: 10.1016/j.jclepro.2004.04.007.

Barros, 2015 – Entrevista personal con M. Barros Somoza, Arquitecto (Ingeniería y Sistemas para la Defensa de España, ISDEFE), mantenida en Ferrol (A Coruña), en junio de 2015.

Berndt, 2009 – “Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate”, M.L. Berndt, *Construction and Building Materials*, 23, pp. 2606-2613, Elsevier, 2009.

Bestratén y Turmo, 1982 – “Estadísticas de accidentabilidad en la empresa”, Nota Técnica de Prevención nº1, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Madrid, 1982.

Boden y Marland, 2010 – “Global CO₂ emissions from fossil-fuel burning, cement manufacture, and gas flaring: 1751-2007”, T. Boden, G. Marland, Carbon Dioxide Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, United States Department of Energy, 2010.

Bossel, 1999 – “Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications. A report to the Balaton Group”, H. Bossel, IISD, Canada, 1999.

Burchart-Korol , 2013 - “Life Cycle Assessment of Steel Production in Poland: A Case Study”, D. Burchart-Korol, *Journal of Cleaner Production*, 54, pp. 235-243, Elsevier, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.04.031 .

Burón et al., 2008 – “Desarrollo de alguno de los indicadores: cemento y hormigón preparado”, M. Burón, S. Carrascón, J. M. Carrau, *Cemento y Hormigón*, 913, pp.36-41, Ediciones Técnicas Pauta, 2008.

Burón et al., 2011 - “Recubrimientos recomendables, por razones de durabilidad, a disponer en estructuras de hormigón sometidas a la clase específica de exposición Qb”, M. Burón, J. Gálvez, J. Fernández, P. López, R. D’Ándrea, M. Sanjuán, *Cemento y Hormigón*, 944, pp. 60-66, Ediciones Técnicas Pauta, 2011.

Cagiao, 2011 - “Huella Ecológica del Cemento”, J. Cagiao Villar, Fundación Ingeniería Civil de Galicia, 2011, ISBN: 978-84-615-0034-5.

Cajamar, 2005 - “El sector del cemento en España”, *Boletín Económico-Financiero Cajamar*, suplemento nº22, 2005.

Calavera, 1999 - “Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón”, J. Calavera, Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC), Madrid, 1999, ISBN: 84 88764 05 7.

Carrasco et al., 2003 - “Valorización de residuos en la industria cementera”, F. Carrasco, A. García-Gardet, F. Cabrero, *Ingeniería Química* 398, pp.134-140, Alción, 2003, ISSN 0210-2064.

CEDEX, 2007 – “Escoria de acería LD”, Catálogo de residuos utilizables en construcción, ficha 2.2, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 2007, www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx, accedido el 27.01.2011.

CEDEX, 2007b – “Escorias de acería de horno de arco eléctrico”, Catálogo de residuos utilizables en construcción, ficha 2.3, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 2007, www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx, accedido el 27.01.2011.

CEDEX, 2007c – “Neumáticos fuera de uso”, Catálogo de residuos utilizables en construcción, ficha 4.2, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 2007, www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx, accedido el 27.01.2011.

CEDEX, 2007d – “Residuos procedentes de la fabricación de hormigón preparado”, Catálogo de residuos utilizables en construcción, ficha 3.2, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 2007, www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx, accedido el 27.01.2011.

CEDEX, 2009 – “Escoria de horno alto”, Catálogo de residuos utilizables en construcción, ficha 2.1, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 2009, www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx, accedido el 27.01.2011.

CEDEX, 2009b – “Residuos de construcción y demolición”, Catálogo de residuos utilizables en construcción, ficha 4.1, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 2009, www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx, accedido el 27.01.2011.

CEDEX, 2009c – “Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias”, Catálogo de residuos utilizables en construcción, ficha 3.1, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 2009, www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx, accedido el 27.01.2011.

CEDEX, 2009d – “Humo de sílice”, Catálogo de residuos utilizables en construcción, ficha 2.4, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 2009, www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx, accedido el 27.01.2011.

Celsa, 2012 – “EPD Steel reinforcement products for concrete”, certificación ENVIRONDEC nº S-P-00305, Celsa Steel Service AB – Sweden, verificado por IVL Swedish Environmental Research Institute, 2012.

Celsa, 2012b – “EPD Steel reinforcement products for concrete”, certificación ENVIRONDEC nº S-P-00306, Celsa Steel Service AS – Norway, verificado por IVL Swedish Environmental Research Institute, 2012.

Celsa, 2012c – “EPD Steel reinforcement products for concrete”, certificación ENVIRONDEC nº S-P-00307, Celsa Steel Service OY – Finland, verificado por IVL Swedish Environmental Research Institute, 2012.

Celsa, 2012d – “EPD Steel reinforcement products for concrete”, certificación ENVIRONDEC nº S-P-00308, Celsa Steel Service A/S – Denmark, verificado por IVL Swedish Environmental Research Institute, 2012.

CEMA, 2015 – “Estudio sobre la RSE en el sector cementero”, Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (CEMA), Madrid, 2015.

Cementos Pórtland Valderribas, 2009 – “Declaración Medioambiental 2008 Uniland Cementera SA Planta Vallcarca”, Grupo Cementos Pórtland Valderribas, Pamplona, 2009.

Cementos Pórtland Valderribas, 2009b – “Declaración Medioambiental 2008 Cementos Alfa – Fábrica de Mataporquera”, Grupo Cementos Pórtland Valderribas, Pamplona, 2009.

Cementos Pórtland Valderribas, 2010 – “Declaración Medioambiental El Alto 2009”, Grupo Cementos Pórtland Valderribas, Pamplona, 2010.

Cementos Pórtland Valderribas, 2010b – “Declaración Medioambiental Lemona Industrial 2009”, Grupo Cementos Pórtland Valderribas, Pamplona, 2010.

Cementos Pórtland Valderribas, 2010c – “Declaración Medioambiental Hontoria 2009”, Grupo Cementos Pórtland Valderribas, Pamplona, 2010.

Cementos Pórtland Valderribas, 2010d – “Declaración Medioambiental 2009 Fábrica de Alcalá de Guadaíra”, Grupo Cementos Pórtland Valderribas, Pamplona, 2010.

Cementos Pórtland Valderribas, 2010e – “Declaración Medioambiental Olazagutía / Olatzi 2009”, Grupo Cementos Pórtland Valderribas, Pamplona, 2010.

Cementos Pórtland Valderribas, 2010f – “Declaración Medioambiental 2009 Uniland Cementera SA Planta Monjos”, Grupo Cementos Pórtland Valderribas, Pamplona, 2010.

CEMEX,2009 – “Declaración Medioambiental 2008 CEMEX España Fábrica de LLoseta”, CEMEX España, Madrid, 2009.

CEMEX,2010 – “Declaración Medioambiental 2009 CEMEX España Fábrica de Alcanar”, CEMEX España, Madrid, 2009.

CGITIG, 2003 – “Honorarios orientativos para los trabajos realizados por los ingenieros técnicos industriales de Galicia”, Consejo Gallego de Ingenieros Técnicos Industriales de Galicia, Diario Oficial de Galicia nº 252, del 30 de diciembre de 2003.

Chambers et al., 2000 – “Sharing Nature’s Interest Ecological Footprint as an indicator of sustainability”, N. Chambers, C. Simmons, M. Wackernagel, Routledge, 2000, ISBN: 978-1853837395.

CIMPOR, 2012 – Visita realizada a las instalaciones de la fábrica integral de Cementos Cosmos (Grupo CIMPOR) en Oural, Sarria (Lugo), octubre de 2012.

CIS, 2016 – “Tres problemas principales que existen actualmente en España”, Encuesta multirrespuesta periódica, Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS), www.cis.es, consultado el 05.07.2016.

COAATGU, 2013 - “Base de Datos del Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de la Edificación de Guadalajara: Capítulo 1: Materiales Básicos”, Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de la Edificación de Guadalajara (COAATGU), Guadalajara, 2013.

Cobo, 2010 – “Durabilidad en estructuras de hormigón pretensado”, A. Cobo Escamilla, Hormigón Pretensado, capítulo 15, Fundación Escuela de la Edificación, Universidad Nacional de Educación a distancia (UNED), Madrid, 2010.

Collins, 2010 – “Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint”, F. Collins, *International Journal on Life Cycle Assessment*, 15, pp.549-556, Springer, 2010.

Comisión Europea, 2001 – “Libro Verde. Fomentar un marco europeo para la responsabilidad social de las empresas”, COM(2001)366final, Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas, 2001.

Comisión Europea, 2007 – “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* del 31.08.2007.

Comisión Europea, 2013 – “Informe sobre la responsabilidad social de la empresa en España”, Comisión Europea – Representación para España, Bruselas, 2013.

Comunicación personal, 2012 – Comunicación por correo electrónico con un técnico responsable de una planta de prefabricados de hormigón, realizada en marzo de 2012, omitiéndose los nombres del individuo y de la empresa por razones de confidencialidad.

Comunicación personal, 2014 – Entrevista personal con un técnico responsable de producción y calidad en varias canteras graníticas, mantenida en enero de 2014, omitiéndose los nombres del individuo y de la empresa por razones de confidencialidad.

Cuesta, 2006 - “La Reconversión de la Siderurgia Integral Española, un Modelo Exportable”, A. Cuesta Valle, *Técnica Industrial*, 263, pp. 40-46, Fundación Técnica Industrial, 2006.

CYPE, 2015 – “Generador de Precios, version 2015.f”, CYPE Software, España, 2015.

D’Andréa, 2010 - “Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión”, Tesis Doctoral, R. D’Andréa, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 2010.

Damtoft et al., 2008 – “Sustainable development and climate change initiatives”, J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, E. M. Gartner, *Cement and Concrete Research*, 38, pp. 115-127, Elsevier, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.008.

Day, 2010 - “Construction processes for improved durability”, K. Day, *Concrete Durability: A practical guide to the design of durable concrete structures*, Chapter 8, Ed. M. Soutsos, Thomas Telford Limited, London, 2010, ISBN: 978-0-7277-3517-1.

de la Cruz et al., 2015a – “Comprehensive methods for dealing with uncertainty in assessing sustainability. Part I: the MIVES – Monte Carlo method”, M. P. de la Cruz, A. Castro, A. del Caño, D. Gómez, M. Lara, J. Cartelle, *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency*. Eds: MS García-Cascales, JM Sánchez-Lozano, AD Masegosa, C. Cruz-Corona. IGI-Global. Chapter 4, pp. 69-106, 2015, doi: 10.4018/978-1-4666-6631-3.ch004.

de la Cruz et al., 2015b – “Comprehensive methods for dealing with uncertainty in assessing sustainability. Part II: the Fuzzy-MIVES method”, M. P. de la Cruz, A. Castro, A. del Caño, D. Gómez, M. Lara, G. Gradaille, *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency*, Eds: MS García-Cascales, JM Sánchez-Lozano, AD Masegosa, C. Cruz-Corona. IGI-Global. Chapter 5, pp. 107-140, 2015, doi: 10.4018/978-1-4666-6631-3.ch005.

del Caño, 2016 – Comunicación personal, Alfredo del Caño Gochi, octubre 2016.

del Caño y de la Cruz, 2008 – “Bases y criterios para el establecimiento de un modelo de evaluación de la sostenibilidad en estructuras de hormigón”, A. del Caño Gochi, P. de la Cruz López, *Cemento y Hormigón*, 913, pp.6-14, Ediciones Técnicas Pauta, 2008.

del Caño et al, 2012 - “Uncertainty analysis in the sustainable design of concrete structures: a probabilistic method”, A. del Caño Gochi, D. Gómez López, P. de la Cruz López, *Construction and Building Materials*, 37, pp. 865–873, Elsevier, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.020.

del Caño et al, 2016 – “Fuzzy method for analysing uncertainty in the sustainable design of concrete structures”, A. del Caño Gochi, P. de la Cruz López, D. Gómez López, M. Pérez, *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(7), pp. 924-935, Taylor & Francis, 2016.

del Río, 2008 - “Patología, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado de edificación”, A. del Río Bueno, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2008.

Dempsey et al., 2009 – “The social dimension of sustainable development: defining urban social sustainability”, N. Dempsey, G. Bramley, S. Power, C. Brown, *Sustainable Development*, 19(5), pp. 289-300, Wiley, 2009, doi: 10.1002/sd.417.

Dimoudi y Tompa, 2008 – “Energy and environmental indicators related to construction of office buildings”, A. Dimoudi, C. Tompa, *Resources, Conservation and Recycling*, 53, pp.86-95, Elsevier, 2008.

Dreyer et al., 2006 – “A framework for social life cycle impact assessment”, L. C. Dreyer, M. Z. Hauschild, J. Schierbeck, *International Journal on Life Cycle Assessment*, 11(2), pp. 88-97, Springer, 2006, doi: 10.1065/lca2005.08.223.

Dynapac, 2013 – Catálogo de maquinaria “Dynapac – Atlas Copco Group”, www.dynapac.com, accedido el 07.10.2013.

EEA, 2013 – “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013”, EEA Technical report nº12/2013, European Environment Agency, 2013. ISSN: 1725-2237.

Fernández, 2010 - “Propuesta de indicadores de la eficacia del curado en obra”, L. Fernández Luco, *Concreto y Cemento* 1(2), pp. 17-29, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2010.

Fernández Sela et al., 2016 - “Modelo genérico de evaluación de la sostenibilidad de sistemas estructurales”, M. Fernández Sela, M. P. de la Cruz, A. del Caño, 20th International Congress on Project Management and Engineering, organizado por AEIPRO-IPMA (Asociación Española de

Ingeniería de Proyectos – International Project Management Association) y celebrado en Cartagena (España) del 13 al 15 de julio de 2016, pp. 657-669.

El-Hawary y Abdul-Jallel, 2010 - "Durability assessment of epoxy modified concrete", M. El-Hawary, A. Abdul-Jallel, *Construction and Building Materials*, 24, pp.1523-1528, Elsevier, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.004.

Elkon, 2013 – Catálogo de maquinaria "Elkon Concrete Batching Plants", www.concretebatchingplants.com, accedido el 07.10.2013.

El País, 2016 – "Expertos achacan al paro el repunte de la desigualdad en España", diario El País, Madrid, edición del 10.02.2016.

ENVIRONDEC, 2013 - "The International EPD System", www.environdec.com, 2013.

Eriksson et al., 1996 - "Life cycle assessment of the road transport sector", E. Eriksson, M. Blinge, G. Lovgren, *The Science of Total Environment* 189/190, pp.69-76, Elsevier, 1996, PII: S0084-9697(96)05192-3.

EU, 1999 – "Towards environmental pressure indicators for the EU", European Union, Environment and Energy Paper Theme 8, Luxemburg, 1999.

Feralpi, 2011 – "Dichiarazione Ambientale di Prodotto per tondo in acciaio in barre e rotoli per calcestruzzo armato", certificación ENVIRONDEC nº S-P-00256, Feralpi Siderurgica, verificado por ICMQ SpA, Milano, 2011.

Ferriera Valsabbia, 2011 – "Dichiarazione Ambientale di Prodotto – Barre di tondo in acciaio ad adherenza migliorata per calcestruzzo armato", certificación ENVIRONDEC nº S-P-00253, Ferriera Valsabbia, verificado por ICMQ SpA, Milano, 2011.

FICEM, 2012 – "Informe estadístico 2011", FICEM-APCAC (Federación Interamericana del Cemento), 2012.

Flower y Sanjayan, 2007 – "Green house gas emissions due to concrete manufacture", D. J. M. Flower, J. G. Sanjayan, *International Journal on Life Cycle Assessment* 12 (5), pp.282-288, Springer, 2007.

Folic, 2009 – "Durability design of concrete structures – part 1: analysis fundamentals", R. Folic, *Architecture and Civil Engineering* 7(1), pp. 1-18, 2009, doi: 10.2298/FUACE0901001F.

Furuholt, 1995 - "Life cycle assessment of gasoline and diesel", E. Furuholt, *Resources, Conservation and Recycling* 14, pp. 251-263, Elsevier, 1995, doi: 10.1016/0921-3449(95)00020-J.

Frangopol et al., 1997- "Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures.", D. Frangopol, K. Lin, A. Estes, *Journal of Structural Engineering*, 123(10), pp. 1390-1401, ASCE, 1997, doi:10.1061/(ASCE)0733-9445.

Fussler y James, 1996 – “Driving eco-innovation: a breakthrough discipline for innovation and sustainability”, C. Fussler, P. James, Pitman Publishing, London, 1996.

Garcés et al., 2010 - “The effect of processed fly ashes on the durability and the corrosion of steel rebars embedded in cement-modified fly ash mortars”, P. Garcés, L. Andión, E. Zorzona, M. Bonilla, J. Payá, *Cement and Concrete Composites* 32, pp. 204-210, Elsevier, 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.006.

García, 1994 – “Metodología de la investigación científica. Cómo hacer una tesis en la era de la informática”, O. García, Ediciones CEES, Madrid, 1994.

García et al., 2010 - “Jiménez Montoya Hormigón Armado” 15ª Edición, A. García, F. Morán, J. Arroyo, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 2010.

García et al., 2015 – “El análisis del coste del ciclo de vida como herramienta para la evaluación económica de la edificación sostenible. Estado de la cuestión.”, F. García Erviti, J. Armengot Paradinas, G. Ramírez Pacheco, *Informes de la Construcción*, 67(537):e056, CSIC, 2015, ISSN-L: 0020-0883, doi: 10.3989/ic.12.119.

García Vázquez, 2015 – “La obsolescencia de las tipologías de vivienda de los polígonos residenciales construidos entre 1950 y 1976. Desajustes con la realidad sociocultural contemporánea”, C. García Vázquez, *Informes de la construcción*, 67 EXTRA-1 (m020), CSIC, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.045>.

Garrucho y Portas, 2008 – “Manual de la aplicación del Anejo ICES de la Instrucción EHE.”, I. Garrucho, I. Portas, *Cemento y Hormigón*, 913, pp.44-57, Ediciones Técnicas Pauta, 2008.

Gjorv, 2009 - “Durability design of concrete structures in severe environments”, O. Gjorv, Taylor & Francis, New York, 2009, ISBN13: 978-0-203-93141-7.

Glasser et al., 2008 – “Durability of concrete. Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions”, F. P. Glasser, J. Marchand, E. Samson, *Cement and Concrete Research* 38, pp. 226-246, Elsevier, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.015.

Glavind, 2009 – “Sustainability of cement, concrete and cement replacement materials in construction”, M. Glavind, *Sustainability of Construction Materials*, Ch. 5, CRC Press, 2009.

Goerlich, 2016 – “Distribución de la renta, crisis económica y políticas redistributivas”, F. J. Goerlich Gisbert, Fundación BBVA, Bilbao, 2016, ISBN: 978-84-92937-65-3.

Goggins et al., 2010 – “The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland”, J. Goggins, T. Keane, A. Kelly, *Energy and Buildings*, 42, pp.735-744, Elsevier, 2010.

Gómez et al., 2011 – “Metodología genérica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos. El método MIVES”, D. Gómez López, A. del Caño Gochi, P. de la Cruz López, A. Josa, *Monografía ACHE: Sostenibilidad y construcción*, capítulo 17. Asociación Científico – Técnica del Hormigón Estructural, Barcelona, 2011.

Gómez, 2012 – “Proyecto sostenible de estructuras de hormigón. Evaluación de la sostenibilidad teniendo en cuenta la incertidumbre”, D. Gómez López, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Industrial II, Universidade da Coruña, 2012.

Gómez et al., 2012 - “Herramienta de cálculo para la evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón según la instrucción Española EHE-08”, D. Gómez López, M. P. de la Cruz, A. del Caño, I. Arroyo, *Dyna*, 87(2), pp. 180-189, Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España, 2012.

Gómez et al, 2013 – “Estimación temprana del nivel de sostenibilidad de estructuras de hormigón, en el marco de la instrucción española EHE-08”, D. Gómez López, A. del Caño Gochi, M. P. de la Cruz López, *Informes de la Construcción*, 65 (529), pp. 65-76, CSIC , 2013, doi: 10.3989/ic.11.123.

Gómez et al., 2015 – “Simulation system for managing uncertainty in the sustainable design of concrete structures”, D. Gómez , R. Purriños, A. del Caño, M. P. de la Cruz, *19th International Congress on Project Management and Engineering*, organizado por AEIPRO-IPMA (Asociación Española de Ingeniería de Proyectos – *International Project Management Association*) y celebrado en Granada (España) del 15 al 17 de julio de 2015, pp. 465-477.

GRI, 2011 – Sustainability Reporting Guidelines, version 3.1, Global Reporting Initiative, 2011.

Hammond y Jones, 2008 – “Inventory of carbon and energy, version 1.6.a” G. Hammond, C. Jones, Sustainable Energy Research Team, Dept. Of Mechanical Engineering, University of Bath, 2008.

Hammond y Jones, 2011 - “Inventory of Carbon and Energy (ICE) Version 2.0”, Sustainable Energy Research Team, Dept. Of Mechanical Engineering, University of Bath, 2011.

Heijungs et al., 1992 – “Environmental Life Cycle Assessment of products – Guide”, R. Heijungs (ed), J. B. Guinée, G. Huppes, R. M. Lankreijer, H. A. Udo de Haes, A. Wegener Sleeswijk, Centre of Environmental Science, Leiden, 1992. ISBN: 90-5191-064-9.

Henry y Kato, 2011 – “An assessment framework based on social perspectives and Analytical Hierarchy Process: a case study on sustainability in the Japanese concrete industry”, M. Henry, Y. Kato, *Journal of Engineering and Technology Management* 28, pp. 300-316, Elsevier, 2011, doi: 10.1016/j.engtecman.2011.06.006.

Hu et al., 2006 - “Emission Mitigation of CO2 in Steel Industry: Current Status and Future Scenarios”, C. Hu, L. Chen, C. Zhang, Y. Qi, R. Yin, *Journal of Iron and Steel Research International*, 13, pp 38-42, Elsevier, 2006, doi:10.1016/S1006-706X(06)60107-6 .

IEA, 2004 – “World Energy Outlook 2004”, International Energy Agency, France, 2004.

INE, 2016 – “Encuesta de población activa (EPA). Cuarto trimestre de 2015”, Instituto Nacional de Estadística (INE), Madrid, 2016.

IPCC, 2006 – “Emisiones de la industria de los minerales / Producción de cemento”, Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, vol. 3: Procesos

industriales y uso de productos, cáp. 2.2. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, 2006.

IRO, 2011 – “Dichiarazione Ambientale di Prodotto per tondo in acciaio in barre per calcestruzzo armato”, certificación ENVIRONDEC nº S-P-00257, Industrie Riunite Odolesi, verificado por ICMQ SpA, Milano, 2011.

ISO, 2006 - “ISO 14040:2006 Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures”, International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 2006.

ISO, 2008 – “ISO 15686-5:2008 Buildings and constructed assets - Service-life planning - Part 5: Life-cycle costing”, International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 2008.

Jefatura del Estado, 1995 – “Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de riesgos laborales”, Boletín Oficial del Estado nº 269, de 10.11.1995.

Jefatura del Estado, 1997 – “Ley 7/1997, de 14 de abril, de medidas liberalizadoras en materia de suelo y Colegios Profesionales”, Boletín Oficial del Estado nº 90, de 15.04.1997.

Jefatura del Estado, 2005 – “Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero”, Boletín Oficial del Estado nº 59, de 10.03.2005.

Jefatura del Estado, 2009 – “Ley 25/2009, del 4 de marzo, de Economía Sostenible”, Boletín Oficial del Estado nº 308, de 23.12.2009.

Jefatura del Estado, 2011 – “Ley 2/2011, de 22 de diciembre, de modificación de diversas leyes para su adaptación a la ley sobre el libre acceso a las actividades de servicios y su ejercicio”, Boletín Oficial del Estado nº 55, de 05.03.2011.

Jefatura del Estado, 2013 – “Ley 8/2013, de 26 de junio, rehabilitación, regeneración y renovación urbanas”, Boletín Oficial del Estado nº 153, de 27.06.2013.

Jorgensen et al., 2008 – “Methodologies for Social Life Cycle Assessment”, A. Jorgensen, A. Le Boucq, L. Nazarkina, M. Hauschild, International Journal on Life Cycle Assessment, 13 (2), pp. 96-103, Springer, 2008, doi: 10.1065/lca2007.11.367.

Josa et al., 2007 - “Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU”, A. Josa, A. Aguado, A. Cardim, E. Byars, Cement and Concrete Research, 37, pp. 781-788, Elsevier, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.004.

Josa y Alavedra , 2006 - “El concepto de sostenibilidad”, A. Josa, P. Alavedra, La medida de la sostenibilidad en edificación industrial, pp. 59-70. Editores: R. Losada, E. Rojí, J. Cuadrado, ISBN 84-690-2629-1.

Kannan et al., 2004 - "LCA – LCCA of oil-fired steam turbine power plant in Singapore", R. Kannan, R. Oshman, H. Ho, C. Tso, *Energy Conversion and Management*, 45, pp. 3092-3107, Elsevier, 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2004.01.005.

Kannan et al., 2005 - "Gas fired combined cycle plant in Singapore", R. Kannan, K. Leong, R. Oshman, H. Ho, C. Tso, *Energy Conversion and Management*, 46, pp. 2145-2157, Elsevier, 2005, doi: 10.1016/j.enconman.2004.10.021.

Kannan et al., 2007 - "Life cycle energy, emissions and cost inventory of power generation technologies in Singapore", R. Kannan, K. Leong, R. Oshman, H. Ho, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp. 702-715, Elsevier, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2005.05.004.

Kates et al., 2001 – "Sustainability science", R. W. Kates, W. C. Clark, R. Corell, M. J. Hall, C. C. Jaeger, I. Lowe, J. J. McCarthy, H. J. Schellnhuber, B. Bolin, N. M. Dickson, *Science* 292, pp. 641-642, AAAS, 2001.

Kjellsen et al, 2005 – "CO₂ Uptake during the concrete life cycle: The CO₂ balance of concrete in a life cycle perspective", K. O. Kjellsen, M. Guimaraes, A. Nilsson, Nordic Innovation Centre (NORDEN), 2005.

Kumar et al., 2009 – "An overview of sustainability assessment methodologies", R. Kumar Singh, H. R. Murty, S. K. Gupta, A. K. Dikshit, *Ecological Indicators*, 9, pp. 189-212, Elsevier, 2009, doi: 10.1016/j.ecolind.2008.05.011

Kurtz et al, 2015 – "Obsolescencia de la envolvente térmica y acústica de la vivienda social de la posguerra española en áreas urbanas vulnerables. El caso de Zaragoza", F. Kurtz, M. Monzón, B. López-Mesa, *Informes de la construcción* 67 EXTRA-1 (m021), CSIC, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.062>.

Labahn y Kohlaas, 1983 - "Cement Engineer's Handbook, 4th english edition", O. Labahn, B. Kohlaas, Bauverlag GMBH, Wiesbaden, 1983, ISBN 3-7625-0975-1.

Labuschagne y Brent, 2006 – "Social indicators for sustainable project and technology life cycle management in the process industry", C. Labuschagne, A. C. Brent, *International Journal on Life Cycle Assessment*, 11 (1), pp. 3-15, Springer, 2006, doi: 10.1065/lca2006.01.233.

Lenzen, 2008 - "Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review", M. Lenzen, *Energy Conversion and Management*, 49, pp. 2178-2199, Elsevier, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.01.033.

Liebherr, 2013 – Catálogo de maquinaria "Liebherr", www.liebherr.com, accedido el 07.10.2013.

LIS-UDC, 2010 – "Huella ecológica del cemento – Capítulo 17 – Impacto ambiental de la industria cementera y del hormigón: su medida y acciones correctoras", Laboratorio de Ingeniería Sostenible, Universidade da Coruña, 2010.

López et al., 1991 - "La importancia del curado en el comportamiento posterior frente a la corrosión de estructuras de hormigón armado", W. López, S. Feliú, J. González, C. Andrade, *Materiales de Construcción*, 41(223), CSIC, 1991.

López-Mesa et al., 2009 – "Comparison of environmental impacts of building structures with in situ cast floors and with precast concrete floors", B. López-Mesa, A. Pitarch, A. Tomás, T. Gallego, *Building and Environment*, 44, pp.699-712, Elsevier, 2009.

López-Mesa, 2012 – Comunicación mediante correo electrónico, abril de 2012.

Losada et al., 2008 – "Evaluación del ICES en un edificio de 28 viviendas de VPO", R. Losada, E. Rojí, J. Cuadrado, *Cemento y Hormigón*, 913, pp.58-65, Ediciones Técnicas Pauta, 2008.

Ludevid, 2015 – "Nota Técnica: Hacia la generalización de la rehabilitación integral o arquitectónica de la edificación española", J. Ludevid, *Informes de la construcción* 67 EXTRA-1 (nt001), CSIC, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.053>.

Ludin, 2003 – "Indicators for measuring the sustainability of urban water systems – A Life Cycle approach", U. Ludin, PhD. Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2003.

Mackay, 2009 – "Durability", S. Mackay, *ICE Manual of Construction Materials*, Chapter3, Institution of civil Engineers (ICE), Ed. M. Forde, Thomas Telford Limited, London, 2009, doi: 10.1680/mocm.35973.033.

Marceau et al., 2010 – "Life cycle inventory of portland cement manufacture", M. L. Marceau, M. A. Nisbet, M. G. VanGeem, *PCA R&D Serial N° SN2095b.02.*, Portland Cement Association, Illinois, 2006/2010.

Maxam, 2012 - Hojas de datos de la familia de explosivos "RIOGEL", tomadas de www.maxam.com, accedido el 08.06.2012.

Medina et al., 2011 - "Armaduras de nuevos aceros inoxidable con bajo contenido en níquel. Comportamiento frente a corrosión inducida por cloruros", E. Medina Sánchez, S. Fajardo, D. Martínez Bastidas, *Ingeniería Química*, 499, pp.80-84, Alción, 2011, ISSN: 0797-4930.

McGraw-Hill, 2003 – "Dictionary of Engineering, 2nd edition", McGraw-Hill, 2003, ISBN: 063-9785503507.

McKenzie, 2004 – "Social sustainability: towards some definitions", S. McKenzie, Hawke Research Institute, University of South Australia, Magill, 2004.

Meadows et al., 1972 – "The limits of growth", D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W. Behrens, Universe Books, New York, 1972.

MEGASA, 2013 – Entrevistas personales mantenidas con técnicos del grupo MEGASA SIDERÚRGICA, de Narón (A Coruña), en septiembre de 2013.

Meka, 2013 – Catálogo de maquinaria “Meka Concrete Batching Plants”, www.mekaconcreteplants.com , accedido el 07.10.2013.

Mel et al., 2013 – “Análisis del consumo energético y de las emisiones de CO₂ en la construcción de estructuras de hormigón en España”, J. Mel Fraga, A. del Caño Gochi, M. P. de la Cruz López, DYNA, 88 (1), pp. 59-67, Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España, 2013, doi: 10.6036/5078 .

Mel et al., 2014a – “Sostenibilidad en la fabricación de cemento en España: análisis del consumo energético y de las emisiones de CO₂”, J. Mel Fraga, A. del Caño Gochi, M. P. de la Cruz López, *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 02-001-1/16), celebrado en Alcañiz (España), 16-18 de julio de 2014.

Mel et al., 2014b – “Sostenibilidad en la producción de árido granítico en el noroeste de España: consumo energético y emisiones de CO₂”, J. Mel Fraga, A. del Caño Gochi, M. P. de la Cruz López, *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 02-002-1/12), celebrado en Alcañiz (España), 16-18 de julio de 2014.

Mel et al., 2014c – “Sostenibilidad en la fabricación de armaduras de acero en España: análisis del consumo energético y de las emisiones de CO₂”, J. Mel Fraga, A. del Caño Gochi, M. P. de la Cruz López, *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 02-003-1/9), celebrado en Alcañiz (España), 16-18 de julio de 2014.

Mel et al., 2014d – “Sostenibilidad en la preparación y puesta en obra de hormigón en España: análisis de consumo energético y emisiones de CO₂”, J. Mel Fraga, A. del Caño Gochi, M. P. de la Cruz López, *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 02-004-1/12), celebrado en Alcañiz (España), 16-18 de julio de 2014.

Mel et al., 2015 – “Análisis de sensibilidad y estudio crítico del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la Instrucción Española de Hormigón Estructural”, J. Mel Fraga, D. Gómez López, M. P. de la Cruz López, A. del Caño Gochi, Informes de la construcción 67(539): e106, CSIC, 2015, doi: 10.3989/ic.14.126.

Ministerio de Empleo y Seguridad Social, 2015 – Estadística de accidentes de trabajo. Enero – diciembre 2014 (Datos provisionales de avance), Madrid, 2015.

Ministerio de Medio Ambiente, 2004 – “Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento”, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2004.

Ministerio de Medio Ambiente, 2012 - “Instalaciones afectadas por la Ley 1/2005. Informe de aplicación”, correspondientes a los años 2006 – 2010. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2012.

Ministerio de Medio Ambiente, 2012b - Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, www.prtr-es.es, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2012.

Ministerio de la Presidencia, 1997 – “Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción”, Boletín Oficial del Estado nº 256, de 25.10.1997.

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, de 22.08.2008.

Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 1997 – “Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención”, Boletín Oficial del Estado nº 27, de 31.01.1997.

Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2008 – “Real Decreto 221/2008, de 15 de febrero, por el que se crea y regula en Consejo Estatal de Responsabilidad Social de las Empresas”, Boletín Oficial del Estado nº52, de 29.02.2008.

Ministerio de Vivienda, 1977 – “Real Decreto 2512/1977, de 17 de junio, por el que se aprueban las tarifas de honorarios de los arquitectos en trabajos de su profesión”, Boletín Oficial del Estado nº 234, de 30.09.1977.

Molina, 2008 - “La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón”, Tesis Doctoral, O. Molina, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 2008.

Montalvo, 2002 – “Monográfico Desarrollo Sostenible – Presentación”, A. Montalvo Santamaría, Información Comercial Española, 800, pp. 3-14, Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, 2002.

Moser, 1999 – “Towards the practical evaluation of service life – Illustrative applications of the probabilistic approach”, K. Moser, Durability of Building Materials and Components 8, pp. 1319-1329, Institute for Research in Construction, Ontario, 1999.

Narasimhan & Chew, 2009 – “Integration of durability with structural design: an optimal life cycle cost based design procedure for reinforced concrete structures”, H. Narasimhan, M. Y. L. Chew, Construction and Building Materials 23, pp. 918-929, Elsevier, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.016.

Navarro, 2004 - “La larga marcha de la siderurgia española hacia la competitividad”, M. Navarro, Economía Industrial nº 355-356, pp. 167-184, Ministerio de Economía, Turismo y Agenda Digital, 2004, ISSN: 0422-2784.

Nisbet et al., 2000 - “Environmental Life Cycle Inventory of portland cement concrete”, M. Nisbet, M. VanGeem, J. Gadia, M. Marceau, PCA R&D Serial N° 2137, Portland Cement Association, Illinois, 2000.

Odeh & Cockreill, 2008 - “Life cycle analysis of UK coal fired power plants”, N. Odeh, T. Cockreill, Energy Conversion and Management , 49 , pp. 212-230, Elsevier, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2007.06.014.

OECD, 1998 – “Towards sustainable development: environmental indicators”, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1998.

OFICEMEN – ANEFHOP, 1978 - “Manual de Consejos Prácticos sobre Hormigón”, Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN), Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP), Madrid, 1978.

OFICEMEN, 2007 – “Anuario 2006”, Agrupación de Fabricantes de Cemento de España, Madrid, 2007.

OFICEMEN, 2008 – “Estudio sobre la viabilidad de la mejora en el transporte de mercancías mediante el uso de vehículos de gran capacidad (megatrucks) y la necesidad de adecuación de las infraestructuras”, Agrupación de Fabricantes de Cemento de España, Madrid, 2008.

OFICEMEN, 2012 – “Anuario 2011”, Agrupación de Fabricantes de Cemento de España, Madrid, 2012

OFICEMEN, 2012b - “Datos Estadísticos 2006-2010”, Asociación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN), Madrid, www.oficemen.com, accedido 10.11.2012.

Ortiz y Matthew, 2012 – “Desigualdad global: la distribución del ingreso en 141 países”, I. Ortiz, M. Cummins, Documento de trabajo sobre política económica y social, United Nations Children’s Fund (UNICEF), New York, 2012.

Osborne, 1999 - “Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete”, G. Osborne, Cement and Concrete Composites, 21, pp. 11- 21, Elsevier, 1999, PII: S0958-9465(98)00032-8.

Pacios y Martos, 2008 – “Estimación del ICES en ejemplos de edificación”, A. Pacios, G. Martos, Cemento y Hormigón, 913, pp.68-81, Ediciones Técnicas Pauta, 2008.

Pade y Guimaraes, 2007 – “The CO2 uptake of concrete in a 100 year perspective”, C. Pade, M. Guimaraes, Cement and Concrete Research, 37, pp. 1348-1356, Elsevier, 2007.

Parlamento Europeo, 2003 – “Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 2003 por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad”, Diario Oficial de la Unión Europea de 25.10.2003.

Parlamento Europeo, 2009 - “Reglamento (CE) nº 1221/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de noviembre de 2009 relativo a la participación voluntaria de organizaciones en un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS)”, Parlamento Europeo, Diario Oficial de la Unión Europea de 22.12.2009.

Parlamento Europeo, 2009 – “Reglamento (CE) nº 1221/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de noviembre de 2009 relativo a la participación voluntaria de organizaciones en un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS)”, Diario Oficial de la Unión Europea de 22.12.2009.

Pérez y Monzón, 2008 - “Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión”, P. Pérez Martínez, A. Monzón de Cáceres, Observatorio Medioambiental, 11 , pp.127-147, Universidad Complutense de Madrid, 2008.

Piketty, 2014 – “El capital en el siglo XXI”, Thomas Piketty, Fondo de Cultura Económica de España, 2014. ISBN: 9788437507231.

Pita Graña, 2012 – Visita a la planta de hormigón preparado de Hormigones Pita Graña en Narón (A Coruña), en agosto de 2012.

PNUD (2006). Informe sobre Desarrollo Humano 2006. Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua. Mundi-Prensa & PNUD. Web del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), <http://hdr.undp.org>, consultado el 01.04.2017.

PNUD (2017). Objetivos de desarrollo sostenible. Web del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Web del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), <http://hdr.undp.org>, consultado el 01.04.2017.

Polder, 1996 - “The influence of blast-furnace slag, fly ash and silica fume on corrosion of reinforced concrete in marine environment”, R. Polder, HERON, 41 (4), pp. 287-300, 1996, TNO Building and Construction Research, ISSN: 0046-7316.

PRé Consultants, 1997 – “SimaPro – The software tool to analyse and develop environmentally sound products”, PRé Consultants, 1997.

PRé Consultants, 2004 – “The Eco-indicator 99 – a damage oriented method for Life Cycle Assessment. Methodology report”, Pre Consultants, 2004.

PRé Consultants, 2016 – Software Simapro, www.pre-sustainability.com/simapro, Pre Consultants, 2016.

Pueyo, 1996 - “¿Cuándo ha sido un oligopolio la industria del cemento artificial? El caso español, 1908-1992”, J. Pueyo Sánchez, Revista de Historia Industrial, 9, pp.83-116, Universidad de Barcelona, 1996.

Pulido, 2003 – “Desarrollo sostenible: un reto central para el pensamiento económico”, A. Pulido San Román, Estudios de Economía Aplicada 21 (2) , pp. 203-220, Asociación Española de Economía Aplicada, 2003.

Putzmeister, 2013 – Catálogo de maquinaria “Putzmeister Ibérica”, www.putzmeister.es , accedido el 07.10.2013.

Querouil, 2015 – “El saqueo. Sucio negocio: el comercio de arena”, M. Querouil, GEO nº 340, pp. 38-45, G+J España, 2015.

Quintela et al., 2016 - “Sistema difuso de apoyo en la evaluación de la sostenibilidad, teniendo en cuenta la incertidumbre”, B. Quintela, A. del Caño, M. P. de la Cruz, *20th International Congress on Project Management and Engineering*, organizado por AEIPRO-IPMA (Asociación Española de Ingeniería de Proyectos – *International Project Management Association*) y celebrado en Cartagena (España) del 13 al 15 de julio de 2016, pp. 2243-2255.

REE, 2007 – “El sistema eléctrico español – 2006”, Red Eléctrica de España, Madrid, 2007, www.ree.es/sistema.electrico/, accedido el 10.04.2012.

REE, 2008 – “El sistema eléctrico español – 2007”, Red Eléctrica de España, Madrid, 2008, www.ree.es/sistema.electrico/, accedido el 10.04.2012.

REE, 2009 – “El sistema eléctrico español – 2008”, Red Eléctrica de España, Madrid, 2009, www.ree.es/sistema.electrico/, accedido el 10.04.2012.

REE, 2010 – “El sistema eléctrico español – 2009”, Red Eléctrica de España, Madrid, 2010, www.ree.es/sistema.electrico/, accedido el 10.04.2012.

REE, 2011 – “El sistema eléctrico español – 2010”, Red Eléctrica de España, Madrid, 2011, www.ree.es/sistema.electrico/, accedido el 10.04.2012.

Remus et al., 2013 - “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production”, R. Remus, M. A. Aguado, S. Radier, L. Delgado, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, 2013, JRC 69967, ISBN 978-92-79-26475-7, doi: 10.2791/97469.

Roncero, 2011 - “El Papel de los Aditivos Químicos en la Sostenibilidad”, J. Roncero, Monografía ACHE: Sostenibilidad y Construcción, capítulo 8, Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Barcelona, 2011.

Rosado, 1997 - “La organización industrial del sector cementero español (1942-1996)”, A. Rosado Cubero, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1997.

Sakamoto et al., 1999 - “Estimation of Energy Consumption for each Process in the Japanese Steel Industry: a Process Analysis”, Y. Sakamoto, Y. Toonoka, Y. Yanagisawa, Energy Conversion and Management, 40 (18), pp. 1129-1140, Elsevier, 1999, PII: S0 196-8904(99) 00025-4.

San José y Josa, 2008 – “Planteamiento MIVES para la evaluación. El caso de la EHE”, T. San José, A. Josa, Cemento y Hormigón, 913, pp.26-34, Ediciones Técnicas Pauta, 2008.

Sánchez, 2012 – “La fusión accidental de una fuente de Cs en una acería de horno eléctrico”, C. Sánchez Fransench, Siderúrgica Sevillana, Sevilla, 2012.

Sanjuán, 1992 – “Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón”, M. A. Sanjuán Barbudo, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1992.

Sany, 2013 – Catálogo de maquinaria “Sany Group”, www.sanygroup.com, accedido el 07.10.2013.

Schwing, 2013 - Catálogo de maquinaria “Schwing – Stetter Ibérica”, www.schwing.es, accedido el 07.10.2013.

Schorcht et al., 2013 – “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide”, F. Schorcht, I. Kourti, B. M. Scalet, S. Roudier, L. Delgado

Sancho, JRC Reference Reports, European Commission, Luxembourg, 2013. ISBN: 978-92-79-32944-9. DOI: 10.2788/12850.

SEOPAN, 2008 - "Manual de Costes de Maquinaria 2008", Asociación de Empresas Constructoras de Ámbito Nacional (SEOPAN), Madrid, 2008.

Serra, 2004 - "Cambio climático y comercio de emisiones", M. A. Serra, Cemento y Hormigón, 869, pp.94-103, Ediciones Técnicas Pauta, 2004.

Söylev y Richardson, 2008 - "Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report", T. Söylev, M. Richardson, Construction and Building Materials, 22, pp.609-622, Elsevier, 2008.

Spath et al., 1999 - "Life cycle assessment of coal-fired power production", P. Spath, M. Mann, D. Kerr, National Renewable Energy Laboratory, United States Department of Energy (DOE), 1999, NREL/TP-570-25119.

Thinkstep, 2016 - Software GaBi, www.gabi-software.com, Thinkstep, 2106.

Tiktin, 1998 - "Procedimientos Generales de Construcción - Procesamiento de Áridos, Instalaciones de Hormigonado, Puesta en Obra de Hormigón", J. Tiktin, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 1998, ISBN: 84-7493-205-X.

U.S. EPA, 2010 - "Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emission from the iron and steel industry", Office of Air and Radiation, United States Environmental Protection Agency, 2010.

UN, 1992 - "Rio Declaration on Environment and Development." United Nations Conference on Environment and Development (UNCED). Río de Janeiro, 1992.

UN, 1987 - "Our Common Future" (Brundtland Report). United Nations World Commission on Environment and Development (WCED), New York, 1987.

UN, 1998 - "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", Naciones Unidas, New York, 1998.

UN, 2015 - "Transformar nuestro mundo: la agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible", Asamblea General de las Naciones Unidas, New York, 2015.

UNEP, 2000 - "Integrated environmental and economic accounting - An operation manual", United Nations Environmental Programme, Oxford University Press, 2000.

UNESID, 2015 - Registros estadísticos de la Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID), Madrid, en www.unesid.org, accedido el 23.03.2015.

UPC, 2014 - "Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible", Módulo Programador, versión 2.1.0, Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.

Vacas y Zorzona, 2008 – “Aplicación del ICES a una obra de infraestructura”, A. Vacas, B. Zorzona, Cemento y Hormigón, 913, pp.94-103, Ediciones Técnicas Pauta, 2008.

Vaquero, 2010 - “Aceros revestidos con epoxi – Una técnica viable para luchar contra la corrosión”, J. Vaquero, Zuncho, 25, pp.13-25, Calidad Siderúrgica, 2010.

Varela, 2015 – Entrevista personal mantenida con J. M. Varela Iglesias, Arquitecto (Ministerio de Defensa – Armada Española), en Ferrol (A Coruña), en junio de 2015.

Varun y Prakash, 2009 - “LCA of renewable energy for electricity generation systems – A review”, I. Varun Bhat, R. Prakash, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, p.1067-1073, Elsevier, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.08.004.

Vieitez y Ramirez, 1984 – “Patología de la construcción en España: aproximación estadística”, J. A. Vieitez Chamosa, J. L. Ramírez Ortiz, Informes de la Construcción, 36(364), pp. 5-15, CSIC, 1984.

Vifell y Soneryd, 2012 – “Organizing matters: how the social dimension gets lost in sustainability projects”, A. C. Vifell, L. Soneryd, Sustainable Development, 20, pp. 18-27, Wiley, 2012, doi: 10.1002/sd.461.

Wackernagel y Rees, 1996 – “Our ecological footprint: reducing human impact on the earth”, M. Wackernagel, W. Rees, BC, New Society Publishers, Gabriola Island, 1996.

Warhurst, 2002 – “Sustainability indicators and sustainability performance management. Report to the project: Mining, Minerals and sustainable Development (MMSD)”, A. Warhurst, International Institute for Environment and Development (IIED), Warwick (England), 2002.

World Steel, 2013 -, “Steel Statistical Yearbook 2012”, World Steel Association, Brussels, 2013.

Wheat, 2002 - “Using polymers to minimize corrosion of steel in concrete”, H. Wheat, Cement and Concrete Composites, 24, pp. 119-126, Elsevier, 2002, doi: 10.1016/S0958-9465(01)00032-4.

WWF, 2012 – “Living Planet Report 2012”, WWF International, Geneva, 2012, ISBN 978-2-940443-37-6.

Yan et al., 2010 – “Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong”, H. Yan, Q. Shen, L. C.H. Fan, Y. Wang, L. Zhang, Building and Environment, 45, pp.949-955, Elsevier, 2010.

Yellishetty et al., 2011 - “Environmental Life-Cycle Comparisons of Steel Production and Recycling: Sustainability Issues, Problems and Prospects”, M. Yellishetty, P. Rasjith, A. Tharesmarajah, Environmental Science and Policy, 14, pp. 650-663, Elsevier, 2011, doi: 10.1016/j.envsci.2011.04.008

Yepes, 2015 – “Durabilidad y vida útil de infraestructuras”, V. Yepes, <http://victoryepes.blogs.upv.es/tag/durabilidad/>, accedido el 22.02.2015.

Zheng et al., 2012 - "The effect of a surface-applied corrosion inhibitor on the durability of concrete", H. Zheng, W. Li, F. Ma, Q. Kong, Construction and Building Materials, 37, pp.36-40, Elsevier, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.007.

ANEJO 2: CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES CONTAMINANTES EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

ANEJO 2: CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES CONTAMINANTES EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

A2.1 INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica está presente en la mayor parte de los procesos analizados en los capítulos 4 a 7 de esta Tesis. Dentro del contexto de un análisis de ciclo de vida, el consumo eléctrico supone una entrada al sistema que lleva aparejada su propia carga de energía primaria y emisiones contaminantes.

El perfil ambiental de la energía eléctrica se encuentra documentado en diversas referencias bibliográficas, al igual que muchos otros aspectos tratados anteriormente. Sin embargo, en este caso los valores reseñados pueden presentar grandes variaciones entre un país y otro; e incluso variar dentro de un mismo país en un intervalo de tiempo relativamente corto. El motivo es que la producción eléctrica no obedece a una única fuente o tecnología, sino que es resultado de una combinación de fuentes de distinta naturaleza que constituyen el denominado "mix energético". La composición de esta mezcla define el funcionamiento del sistema eléctrico considerado (influyendo, entre otros aspectos, en la flexibilidad para adaptarse a la demanda instantánea de energía) y tiene una gran importancia en los parámetros que resultan de interés para el estudio realizado.

A modo de ejemplo, se pueden comparar el mix del estado australiano de Melbourne (señalado por Flower y Sanjayan, 2007, en su estudio sobre emisiones en la producción de hormigón), en el que el 91,3% de la energía eléctrica procede del carbón y sólo un 2% de fuentes renovables, ocasionando un factor de emisiones de 1,392 kgCO₂/KWh, con lo indicado por Celsa, 2012d, para la producción de acero en Dinamarca, donde la práctica totalidad del suministro eléctrico procede de centrales hidráulicas y eólicas.

De este modo, se ha encontrado oportuno el definir los consumos de energía primaria y las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes asociados a la producción de energía eléctrica en España, de cara a obtener una imagen lo más real posible de los procesos involucrados en el sector del hormigón. Este Anejo tiene por objeto presentar los cálculos realizados y los resultados obtenidos, empleados en el cuerpo central de la Tesis. El estudio realizado abarca los años 2006 a 2010, ciñéndose pues al mismo periodo temporal que se refleja en el estudio de las plantas de producción de cemento (capítulo 4); originalmente, ambos estudios fueron desarrollados en paralelo para poder asignar a cada año sus parámetros correspondientes.

A2.2 METODOLOGÍA

A2.2.1.- Balance anual de energía eléctrica

La base departida para el estudio de la producción eléctrica son los balances anuales publicados por Red Eléctrica de España (REE, 2007; 2008; 2009; 2010; 2011), organismo responsable de la gestión técnica del sistema eléctrico. Dichos balances permiten conocer el total de energía producida y su desglose en las distintas fuentes:

Tipo energía / Año	2006	2007	2008	2009	2010
Hidráulica	29301	30318	25845	29345	45464
Nuclear	60126	55102	58973	52761	61990
Carbón	69326	75028	49647	37311	25478
Fuel	14432	10827	10691	10056	9553
Ciclo combinado	67012	72219	95529	82239	68595
Eólica	22924	27247	31777	36991	43692
Otras Renovables	4184	5226	7645	12057	12319
Reg. Especial no renovables	19804	20580	23314	27407	29045
TOTAL (GWh)	287109	296547	303421	288167	296136

Tabla A2.1 – Balance de energía eléctrica 2006-2010. Fuente: REE, 2007; 2008; 2009; 2010; 2011.

A2.2.2.- Determinación de la energía primaria

Para la generación de la energía eléctrica reflejada en los balances anteriores, ha sido necesario emplear una cantidad superior de energía primaria, en base principalmente a dos factores:

- (i) El rendimiento de las plantas de producción, en las cuales únicamente es posible transformar en energía eléctrica una parte de la energía química, mecánica o de otro tipo que reciben como entrada a su sistema.
- (ii) La existencia de otras aportaciones energéticas adicionales durante el ciclo de vida de las plantas energéticas, incluyendo su construcción y desmantelamiento, extracción, procesado y transporte de combustible, etc.

En las centrales térmicas de carbón la energía eléctrica generada suele ser del orden de un tercio de la energía térmica obtenida de la combustión. Así, por ejemplo, en el Reino Unido la eficiencia media de las plantas térmicas es de un 35% (Odeh y Cockreill, 2008). La referencia Babbitt y Lindner, 2005, recoge las eficiencias de cuatro plantas estudiadas en Florida (EEUU), cuyo ratio está entre el 30,7% y el 39,5%. En EEUU la eficiencia media de las centrales norteamericanas convencionales es del 32% (Spath et al., 1999). En España, analizando los datos de consumo y producción de 2010, recogidos en la referencia Ministerio de Medio Ambiente, 2012b, para un conjunto de cinco plantas térmicas se obtienen eficiencias comprendidas entre el 31,5% y el 39%. La eficiencia de las centrales de fuelóleo es muy similar (36% según Kannan et al., 2004; 39% analizando los datos de 2010 correspondientes a una planta española). La producción de energías no renovables acogidas al Régimen Especial de generación (plantas de cogeneración a partir de combustibles líquidos o

gaseosos) se trata aquí con ratios similares a los de las centrales de fuelóleo, por ser el tipo más similar a éstas.

La eficiencia es más alta en las centrales de ciclo combinado, que habitualmente operan con gas natural como combustible. Suelen alcanzar cifras en torno al 50% de eficacia, como confirma el análisis de los datos recogidos en 2010 para seis centrales españolas de este tipo, con resultados entre el 48,4% y el 56,7% (Kannan et al., 2005).

Existen además una serie de contribuciones de segundo o tercer orden, entre las que se incluye la extracción, preparación y transporte de los combustibles, las pérdidas de éstos, la construcción de las propias plantas y equipos, y el desmantelamiento de las mismas tras su vida útil, entre otros aspectos. Según las referencias Kannan et al., 2004; 2005; 2007, la energía procedente del combustible supone el 91,9% del total en las centrales de fuelóleo y el 92,4% en las de ciclo combinado. Para el presente estudio se han considerado eficiencias del 33% para las centrales de carbón y fuelóleo y del 50% para las de ciclo combinado, y en los tres casos se toma la energía del combustible como un 90% de la energía total a lo largo del ciclo de vida.

En energía nuclear se estima un consumo energético fósil de entre 0,1 y 0,3 kWh térmicos por cada kWh eléctrico (Lenzen, 2008). Además, y al igual que ocurre en las plantas de carbón, se considera un rendimiento termodinámico de las mismas del 33%. Sobre las fuentes de energía renovables se ha encontrado mayor divergencia entre los datos ofrecidos por la bibliografía, dada la gran variedad de instalaciones posibles. Por analogía con las anteriores, se asume como hipótesis que el consumo energético medio, asociado al ciclo de vida de las mismas, sea de un 10% de la energía final producida.

De esta forma, se recogen en la tabla A2.2 las hipótesis asumidas para la determinación de energía primaria según el tipo de fuente.

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

Tabla A2.2. Hipótesis asumidas para el cálculo de la energía primaria en el sistema eléctrico.

El resultado de aplicar dichas hipótesis al balance de producción se refleja en la tabla A2.3.

Tipo energía / año	2006	2007	2008	2009	2010
Hidráulica	32.231	33.350	28.430	32.280	50.010
Nuclear	83.191	90.034	59.576	44.773	30.574
Carbón	233.421	252.620	167.162	125.626	85.785
Fuel	48.593	36.455	35.997	33.859	32.165
Ciclo combinado	148.916	160.487	212.287	182.753	152.433
Eólica	25.216	29.972	34.955	40.690	48.061
Otras Renovables	4.602	5.749	8.410	13.263	13.551
Reg. Especial no renovables	66.680	69.293	78.498	92.279	97.795
TOTAL (GWh)	642.850	677.957	625.313	565.523	510.374

Tabla A2.3 – Energía primaria por tipo de fuente, expresada en GWh.

A2.2.3.- Determinación de las emisiones de CO₂

Dado que las instalaciones de producción de energía eléctrica de potencia superior a 20 MW están incluidas dentro del ámbito de aplicación de la Ley 1/2005 (Jefatura del Estado, 2005), sus emisiones de CO₂ se encuentran registradas y se publican anualmente por parte del Ministerio de Medio Ambiente a través de los Informes de aplicación de la Ley 1/2005 (Ministerio de Medio Ambiente, 2012). Revisando dichos informes es posible identificar las plantas térmicas (carbón, gas, combustible líquido) en funcionamiento cada año y conocer sus emisiones directas, que se trasladan a la tabla A2.4.

Planta	Tipo	Emisiones CO ₂ 2005 (t)	Emisiones CO ₂ 2006 (t)	Emisiones CO ₂ 2007 (t)	Emisiones CO ₂ 2008 (t)	Emisiones CO ₂ 2009 (t)	Emisiones CO ₂ 2010 (t)
Aboño 1 y 2 (Hidrocantábrico)	carbón	7.949.095	6.960.496	7.898.487	6.598.838	5718881	4.621.665
Aceca 1 y 2 (Iberdrola / Unión Fenosa)	fuel	678.888	683.603	177.672	104.806	14885	75.156
Aceca 3 (Iberdrola)	ciclo comb.	314.278	449.243	690.450	723.359	684578	467.219
Aceca 4 (Unión Fenosa)	ciclo comb.	0	401.075	936.432	848.175	567471	662.650
Algeciras (Viesgo)	fuel	784.539	211.016	6.225	0	0	0
Amorebieta (Bizkaia Energía)	ciclo comb.	794.304	1.154.104	884.718	1.131.891	1533189	918.186
Anllares (CT Anllares)	carbón	2.453.290	2.112.535	2.236.103	2.020.466	274871	445
Arcos 1, 2 y 3 (Endesa)	ciclo comb.	1.173.519	1.878.524	1.377.620	1.571.634	1576931	948.600
Arrúbal 1 y 2 (Gas Natural)	ciclo comb.	1.019.624	1.635.897	1.444.568	1.304.587	659597	479.505
As Pontes 1, 2, 3 y 4 (Endesa)	carbón	9.324.833	9.122.209	8.916.048	7.026.553	5215362	4.457.122
As Pontes 5 (Endesa)	ciclo comb.	0	0	0	954.735	632683	274.469
Bahía de Bizkaia (Iberdrola / BP / Repsol)	ciclo comb.	1.554.145	1.623.067	1.545.087	1.710.775	1612203	1.104.372
Barcelona (Gas Natural)	ciclo comb.	0	0	0	0	0	162.336
Besós 3 (Endesa)	ciclo comb.	837.533	879.605	805.212	929.145	816226	668.287
Besós 4 (Gas Natural)	ciclo comb.	699.286	910.434	894.448	784.092	772523	795.070
Campo de Gibraltar 1 y 2	ciclo comb.	0	0	0	1.510.501	1303055	1.479.121

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

(Nueva Generadora Sur)							
Cartagena 1, 2 y 3 (Gas Natural)	ciclo comb.	0	2.271.228	2.015.198	2.394.252	1292246	1.023.147
Castejón 1 (Eléctrica Ribera del Ebro)	ciclo comb.	770.819	635.370	665.581	1.143.212	800847	1.043.415
Castejón 2 (Fuerzas Eléctricas de Navarra)	ciclo comb.	554.337	489.911	412.435	320.130	555394	265.302
Castelnou (Castelnou Energía)	ciclo comb.	0	610.664	871.506	1.353.341	657872	739.401
Castellón (Iberdrola)	fuel	866.225	600.245	74.773	0	0	0
Castellón 3 y 4 (Iberdrola)	ciclo comb.	1.379.932	1.184.452	893.546	2.016.939	1737484	1.023.219
Cercs (E.ON)	carbón	891.905	1.022.993	732.426	423.328	395150	535.477
Compostilla 2, 3, 4 y 5 (Endesa)	carbón	7.716.629	6.119.184	5.974.704	5.941.881	2643249	209.023
Cristóbal Colón (Endesa)	fuel	135.484	23.962	0	0	0	0
Cristóbal Colón 4 (Endesa)	ciclo comb.	0	0	760.951	888.044	411380	294.648
El Fangal 1, 2 y 3 (AES Energía Cartagena)	ciclo comb.	0	31.508	817.933	1.493.421	1874028	1.255.225
Escatrón (Viesgo)	carbón	67.133	5.556	0	0	0	0
Escatrón 3 (E.ON)	ciclo comb.	0	0	0	421.441	1628992	1.219.395
Escatrón Peaker (Global 3 Combi)	ciclo comb.	0	0	11.628	207.976	74709	38.448
Escombreras (Iberdrola)	fuel	749.397	167.396	24.843	4	0	0
Escombreras 6 (Iberdrola)	ciclo comb.	0	79.222	712.744	1.499.132	611835	443.351
Escucha (E.ON)	carbón	982.336	947.485	404.548	834.231	398515	144.638
Foix (Endesa)	fuel	786.175	428.285	144.947	161.534	36389	4.504
Generación extrapeninsular	varios	11.440.980	11.435.458	11.308.850	11.842.466	11708407	11.389.111
GICC - PL (Elcogas)	gas	1.160.000	1.100.000	1.020.000	1.010.000	1310000	1.380.000
Guardo 1 y 2 (Iberdrola)	carbón	2.717.867	2.173.488	2.703.333	979.841	927811	58.863
La Robla 1 y 2 (Unión Fenosa)	carbón	4.196.260	3.554.304	3.428.296	3.048.474	743673	28.196
Lada 3 y 4 (Iberdrola)	carbón	2.837.088	1.806.590	2.712.072	795.797	668138	653.487
Litoral de Almería 1 y 2 (Endesa)	carbón	7.243.470	6.326.518	7.426.267	4.995.507	5085432	3.838.520
Los Barrios (E.ON)	carbón	3.533.650	3.340.822	3.718.138	1.821.493	2731918	2.191.912
Málaga (Gas Natural)	ciclo comb.	0	0	0	0	0	330.322
Meirama (Unión Fenosa)	carbón	4.221.684	3.847.539	5.132.091	311.624	1481372	769.275
Narcea 1, 2 y 3 (Unión Fenosa)	carbón	3.103.188	2.677.815	3.440.880	2.292.524	803929	1.743
Palos 1, 2 y 3 (Unión Fenosa)	ciclo comb.	1.692.327	2.536.246	2.423.841	2.369.310	1833182	2.021.726
Pasajes (Iberdrola)	carbón	1.328.347	1.123.589	1.304.330	600.509	494061	476.758
Plana del Vent 1 y 2 (Gas Natural)	ciclo comb.	0	0	834.061	1.171.480	705844	161.266
Puentenuovo 3 (E.ON)	carbón	2.126.527	1.407.854	1.919.952	36.162	513895	576.932
Puertollano (E.ON)	carbón	1.193.541	562.635	1.039.547	265.478	89904	230.799
Sabón 1 y 2 (Unión Fenosa)	fuel	530.496	310.591	139.106	211.729	11128	0
Sabón 3 (Unión Fenosa)	ciclo comb.	0	0	0	393.006	499540	531.495
Sagunto 1, 2 y 3 (Gas Natural)	ciclo comb.	0	0	741.233	1.612.340	2178454	2.295.009
San Adrián 1 y 3	fuel	664.411	178.158	106.496	119.600	115745	36.814

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

(Endesa)							
San Roque 1 (Gas Natural)	ciclo comb.	762.775	846.600	570.778	680.155	456326	445.058
San Roque 2 (Endesa)	ciclo comb.	1.002.422	787.348	698.506	856.565	540015	334.194
Santurce 1 y 2 (Iberdrola)	fuel	680.071	458.691	65.576	34.592	20227	0
Santurce 4 (Iberdrola)	ciclo comb.	729.934	461.360	382.602	405.099	525763	247.152
Soto de la Ribera 2 y 3 (Hidrocantábrico)	carbón	4.198.463	3.751.284	3.362.870	1.365.927	1318342	884.421
Soto de la Ribera 4 (CTCC Grupo 4)	ciclo comb.	0	0	0	25.345	543888	539.570
Soto de la Ribera 5	ciclo comb.	0	0	0	0	0	11.106
Tarragona (E.ON)	ciclo comb.	0	0	803.571	775.548	640030	421.079
Tarragona (TarragonaPower)	ciclo comb.	0	0	0	687.953	808240	878.678
Teruel 1, 2 y 3 (Endesa)	carbón	7.350.920	6.347.323	6.785.883	4.707.027	2608886	1.702.691
TOTAL		105.198.127	97.673.482	104.399.112	89.733.974	73.864.695	57.789.573

Tabla A2.4 Emisiones CO2 directas de las centrales térmicas de potencia superior a 20 MW. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

Las centrales nucleares y renovables carecen de emisiones directas; por otra parte las instalaciones denominadas en la tabla A2.1 como “Régimen especial no renovables” están constituidas por plantas de cogeneración y similares, que por lo general son instalaciones térmicas de pequeño tamaño. Dado que este tipo de planta no aparece en los registros resumidos en la tabla A2.4, para tener en cuenta su aportación se ha determinado el factor de emisión directo de las plantas de combustible líquido (emisiones según tabla A2.4 divididas por la producción total según tabla A2.1) y se ha aplicado a su producción total.

La agrupación de los datos anteriores por tipo de energía conduce a la tabla A2.5, de análoga distribución al balance de producción eléctrica presentado en la tabla A2.1.

Tipo energía / Año	2006	2007	2008	2009	2010
Hidráulica	0	0	0	0	0
Nuclear	0	0	0	0	0
Carbón	65.296.538	71.189.624	46.281.267	34.389.366	23.515.790
Fuel	9.378.107	6.894.119	7.181.671	7.198.714	6.831.405
Ciclo combinado	22.998.837	26.315.369	36.271.036	32.276.615	27.442.378
Eólica	0	0	0	0	0
Otras Renovables	0	0	0	0	0
Reg. Especial no renovables	12.868.905	13.104.366	15.661.162	19.619.645	20.770.246
TOTAL (t CO2)	110.542.387	117.503.478	105.395.136	93.484.340	78.559.819

Tabla A2.5 Emisiones CO2 directas según el tipo de energía.

Del mismo modo que se indicó en el epígrafe A2.2.2 para el consumo de energía primaria, la generación eléctrica implica emisiones de CO₂ indirectas adicionales a las anteriores. Para las plantas térmicas de carbón y fuelóleo se asume que las emisiones directas suponen un 90% de las emisiones totales, en consonancia con la literatura al respecto Odeh y Cockreill, 2008 ; Spath et al., 1999; Kannan et al., 2004; Kannan et al., 2005; Varun y Prakash, 2009. En centrales térmicas de ciclo combinado se considera que dichas emisiones directas son un 85% de las totales (Kannan et al.,

2005). Para las energías renovables existen numerosos análisis de ciclo de vida que cuantifican sus emisiones, en función del tipo de instalación considerado. En este trabajo se han tomado valores medios de los rangos de emisiones dados por la referencia Varun y Prakash, 2009, para cada tecnología. La Tabla A2.6 incluye el conjunto de hipótesis que se acaban de mencionar.

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

Tabla A2.6. Hipótesis asumidas para el cálculo de las emisiones de CO₂ en el sistema eléctrico.

Aplicando las hipótesis anteriores a la tabla A2.5 se construye la tabla A2.7, que contiene las emisiones de CO₂ totales atribuidas a cada fuente energética.

Tipo energía	2006	2007	2008	2009	2010
Hidráulica	3.526	3.649	3.110	3.532	5.472
Nuclear	908	832	890	797	936
Carbón	72.551.709	79.099.582	51.423.630	38.210.407	26.128.656
Fuel	10.420.119	7.660.132	7.979.634	7.998.571	7.590.450
Ciclo combinado	27.057.455	30.959.258	42.671.807	37.972.488	32.285.151
Eólica	1.529	1.817	2.120	2.467	2.914
Otras Renovables	596	745	1.089	1.718	1.755
Reg. Especial no renovables	14.298.783	14.560.406	17.401.291	21.799.606	23.078.051
TOTAL	124.334.625	132.286.421	119.483.572	105.989.586	89.093.384

Tabla A2.7. Resumen de emisiones totales de CO₂.

A2.2.4.- Determinación de las emisiones de otros contaminantes

El dióxido de carbono es, por su gran volumen de emisión y su contribución global al efecto invernadero, el contaminante atmosférico de mayor relevancia tanto a nivel legal como académico. No obstante, y como se indica en el capítulo 2, una visión completa del problema de los impactos ambientales de las actividades industriales exige la consideración de múltiples factores adicionales, convenientemente agrupados en indicadores.

De este modo se añaden al CO₂ determinado anteriormente las emisiones de monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, óxidos de nitrógeno y azufre y partículas en suspensión. La intención es ofrecer una imagen de mayor precisión del perfil ambiental de la energía eléctrica, si bien sigue siendo una reducción de un problema real mucho más complejo.

Para determinar las emisiones de NO_x, SO_x, CO, VOC y PM₁₀ se ha consultado la referencia EEA, 2013. De aquí proceden los factores de emisión de las sustancias anteriores, para los diferentes combustibles considerados (carbón, gas natural, fuel residual, gasóleo). Estos factores se encuentran referidos al aporte energético de los combustibles, es decir, están expresados en [g/GJ], y se recogen en la tabla A2.8.

Combustible	NO _x (g/GJ)			CO (g/GJ)			VOC (g/GJ)		
	min	med	max	min	med	max	min	med	max
Carbón	200	209	300	6,15	8,7	15	0,6	1	2,4
Gas Natural	15	89	185	20	39	60	0,65	2,6	10,4
Fuel	70	142	300	9,06	15,1	21,1	1,4	2,3	3,2
Gasóleo	20	91	120	50	570	4000	5	300	500

Combustible	SO _x (g/GJ)			PM10 (g/GJ)		
	min	med	max	min	med	max
Carbón	330	820	5000	2	7,7	200
Gas Natural	0,169	0,281	0,393	0,445	0,89	1,34
Fuel	146	495	1700	1,5	25,2	150
Gasóleo	8	11	40	71	143	285

Tabla A2.8. Factores de emisión de contaminantes en plantas de combustión, según el tipo de combustible. Fuente: EEA, 2013.

La referencia Comisión Europea, 2007, proporciona los factores de emisión de CO₂ para los combustibles anteriores, también referidos al aporte energético, que se muestran en la tabla A2.9.

Combustible	KgCO ₂ /GJ
Carbón	96
Gas Natural	56,1
Fuel	77,3
Gasóleo	74

Tabla A2.9. Factores de emisión de CO₂ en plantas de combustión, según el tipo de combustible. Fuente: Comisión Europea, 2007.

La cantidad de CO₂ emitido por cada tipo de combustible se encuentra registrada en la tabla A2.5, por lo que es posible utilizar su factor de emisión para determinar el aporte térmico en cada caso:

$$\text{Emisiones directas [t CO}_2\text{]} / \text{Factor emisión CO}_2\text{ [t/GJ]} = \text{Aporte térmico [GJ]}$$

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Tipo energía / año	2006	2007	2008	2009	2010
Hidráulica	0	0	0	0	0
Nuclear	0	0	0	0	0
Carbón	680.172.271	741.558.583	482.096.531	358.222.563	244.956.146
Fuel	121.320.918	89.186.533	92.906.481	93.126.960	88.375.226
Ciclo combinado	409.961.444	469.079.661	646.542.531	575.340.731	489.168.948
Eólica	0	0	0	0	0
Otras Renovables	0	0	0	0	0
Reg. Especial no renovables	173.904.116	177.086.025	211.637.318	265.130.344	280.678.997

Tabla A2.10. Aporte térmico de combustibles, en GJ, por tipo de combustible.

A partir de la tabla A2.10 se obtienen las emisiones de cada contaminante por tipo de energía y año, a través de los factores indicados en A2.8.

En el caso de la emisión de CO₂, se han incrementado las emisiones directas según las indicaciones de varias fuentes bibliográficas, para tener en cuenta factores de orden superior, como se ha indicado anteriormente. Para los restantes contaminantes, no se ha localizado la información precisa para realizar el mismo proceso. Por este motivo, se ha decidido aproximar el resultado equivalente incrementando cada factor en la misma proporción en que se incrementa la emisión de CO₂ al tener en cuenta las consideraciones anteriores (entre un 10 y un 12%, aproximadamente).

Los factores de emisión aportados por EEA, 2013, incluyen, para cada sustancia, una terna de valores mínimo, medio y máximo. Se han realizado los cálculos con todos los valores, aunque en la tabla de resultados sólo se incluyen los valores medios, para evitar una complejidad excesiva de la misma. En el caso de la emisión de CO₂ no se dispone de dicha terna de valores, ya que los datos manejados proceden de un registro verificado de emisiones y no de una estimación.

Tipo energía (2006)	NOx (g)	CO (g)	VOC (g)	SOx (g)	PM10 (g)
Carbón	1,42E+11	5,9E+09	680172271	5,6E+11	5237326485
Fuel	1,72E+10	1,8E+09	279038113	6E+10	3057287146
Ciclo combinado	3,65E+10	1,6E+10	1,066E+09	1,2E+08	364865685
Reg. Especial no renovables	1,58E+10	9,9E+10	5,217E+10	1,9E+09	2,4868E+10

Tabla A2.11. Emisión de contaminantes en el año 2006, por tipo de combustible.

Tipo energía (2007)	NOx (g)	CO (g)	VOC (g)	SOx (g)	PM10 (g)
Carbón	1,55E+11	6,5E+09	741558583	6,1E+11	5710001092
Fuel	1,27E+10	1,3E+09	205129026	4,4E+10	2247500631
Ciclo combinado	4,17E+10	1,8E+10	1,22E+09	1,3E+08	417480899
Reg. Especial no renovables	1,61E+10	1E+11	5,313E+10	1,9E+09	2,5323E+10

Tabla A2.12. Emisión de contaminantes en el año 2007, por tipo de combustible.

NUEVO MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Tipo energía (2008)	NOx (g)	CO (g)	VOC (g)	SOx (g)	PM10 (g)
Carbón	1,01E+11	4,2E+09	482096531	4E+11	3712143291
Fuel	1,32E+10	1,4E+09	213684907	4,6E+10	2341243327
Ciclo combinado	5,75E+10	2,5E+10	1,681E+09	1,8E+08	575422853
Reg. Especial no renovables	1,93E+10	1,2E+11	6,349E+10	2,3E+09	3,0264E+10

Tabla A2.13. Emisión de contaminantes en el año 2008, por tipo de combustible.

Tipo energía (2009)	NOx (g)	CO (g)	VOC (g)	SOx (g)	PM10 (g)
Carbón	7,49E+10	3,1E+09	358222563	2,9E+11	2758313731
Fuel	1,32E+10	1,4E+09	214192008	4,6E+10	2346799389
Ciclo combinado	5,12E+10	2,2E+10	1,496E+09	1,6E+08	512053250
Reg. Especial no renovables	2,41E+10	1,5E+11	7,954E+10	2,9E+09	3,7914E+10

Tabla A2.14. Emisión de contaminantes en el año 2009, por tipo de combustible.

Tipo energía (2010)	NOx (g)	CO (g)	VOC (g)	SOx (g)	PM10 (g)
Carbón	5,12E+10	2,1E+09	244956146	2E+11	1886162323
Fuel	1,25E+10	1,3E+09	203263021	4,4E+10	2227055705
Ciclo combinado	4,35E+10	1,9E+10	1,272E+09	1,4E+08	435360364
Reg. Especial no renovables	2,55E+10	1,6E+11	8,42E+10	3,1E+09	4,0137E+10

Tabla A2.15. Emisión de contaminantes en el año 2010, por tipo de combustible.

A2.3 RESULTADOS

Tanto la energía primaria como las emisiones de cada contaminante se dividen por el total de energía eléctrica generada durante el año de referencia, obteniéndose los factores de energía y emisión por kWh que se recogen en la tabla A2.16. Estos factores serán los empleados en la realización de cálculos en los capítulos 4 a 7.

Año	Energía prim. (MJ/KWh)	CO ₂ (Kg/KWh)	NO _x (g/KWh)	CO (g/KWh)	VOC (g/KWh)	SO _x (g/KWh)	PM10 (g/KWh)
2006	8,061	0,433	0,829	0,481	0,212	2,428	0,131
2007	8,230	0,446	0,804	0,466	0,206	2,353	0,127
2008	7,419	0,394	0,713	0,566	0,246	1,659	0,138
2009	7,065	0,368	0,643	0,701	0,321	1,350	0,171
2010	6,204	0,301	0,509	0,699	0,329	0,950	0,171

Tabla A2.16. Factores de energía primaria y emisiones contaminantes del sector eléctrico español entre 2006 y 2010..

ANEJO 3: CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES CONTAMINANTES EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

ANEJO 3: CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES CONTAMINANTES EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

A3.1 INTRODUCCIÓN

El transporte de mercancías (cemento, áridos, acero, materias primas para plantas de producción, etc.) está presente en la mayor parte de los procesos analizados en los capítulos 4 a 7, al igual que la energía eléctrica. En este caso, la contribución energética y de emisiones del transporte se determina partiendo de valores tomados de la bibliografía, sobre los que efectúan determinados ajustes. Este anejo tiene por objeto describir el procedimiento seguido para ello y presentar los resultados que son empleados en el desarrollo de los capítulos de la Tesis mencionados.

A3.2 METODOLOGÍA

A3.2.1.- Intensidad energética del transporte

La intensidad energética IE_x asociada al transporte por carretera procede de Pérez y Monzón, 2008, incrementada en un 5% según Eriksson et al., 1996, para incluir el impacto del ciclo de vida de los vehículos (se toma un porcentaje de recursos invertidos en la fabricación de los camiones inferior al de los turismos debido a que los segundos recorren una distancia mucho mayor que los primeros a lo largo de su vida útil). En Pérez y Monzón, 2008, se indica también la intensidad energética del transporte marítimo internacional, que se ha decidido incrementar en un 1% (a falta de otros datos) para tener en cuenta el ciclo de vida de los buques empleados.

A3.2.2.- Emisiones de CO₂ asociadas al transporte

Los factores de emisión de CO₂ IG_x asociados a los transportes se toman de Pérez y Monzón, 2008, incrementados un 1% según Eriksson et al., 1996, para tener en cuenta las emisiones durante el ciclo de vida de los vehículos.

A3.2.3.- Emisiones de otros contaminantes

Para determinar las emisiones de NO_x, SO_x, VOC, CO y PM₁₀ se toman de la referencia EEA, 2013, los factores de emisión correspondientes, asociados a la combustión de gasóleo o fuelóleo en motores de explosión. Estos factores están dados en g/kg de combustible, por lo que es necesario transformarlos a unidades de g/t-km. Esto se consigue determinando un consumo medio de combustible por tonelada y km a partir del factor de emisión de CO₂ del transporte indicado en A3.2 y el factor de emisión del gasóleo (para transporte terrestre) o fuelóleo (para transporte marítimo) tomados de Comunidad Europea, 2007.

A3.3 RESULTADOS

En base a los cálculos indicados, se han obtenido las intensidades energéticas y de emisiones que se indican en la tabla siguiente:

Parámetro	Transporte por carretera	Transporte marítimo
Intensidad energética (MJ/t·km)	1,47	0,20
Factor de emisión CO ₂ (kg/t·km)	0,098	0,019
Factor de emisión NO _x (g/t·km)	1,070	4,8 · 10 ⁻⁴
Factor de emisión SO _x (g/t·km)	0,0051	1,21 · 10 ⁻⁴
Factor de emisión VOC (g/t·km)	0,062	1,63 · 10 ⁻⁵
Factor de emisión CO (g/t·km)	0,243	4,48 · 10 ⁻⁵
Factor de emisión PM ₁₀ (g/t·km)	0,030	3,75 · 10 ⁻⁵

Tabla A3.1 – Factores de emisión y consumo energético para el transporte. Fuentes: Pérez y Monzón, 2008; Eriksson et al., 1996.