

GENERIC MODEL FOR ASSESSING THE SUSTAINABILITY OF STRUCTURAL SYSTEMS.

Fernández Sela, Miguel; De la Cruz López, M. Pilar; Del Caño Gochi, Alfredo
Universidade da Coruña

Up to the moment, the Spanish EHE (concrete) and EAE (steel) are the only structural Codes including models for assessing the sustainability of structural systems, in the international arena. Those models suffer of an important set of problems, previously identified by various authors. This has led to a poor implementation of them. One of those problems is that the EHE and EAE models are specific for each of those structural systems (concrete, steel). This prevents the corresponding comparisons. Another hitch, much more important, is that the results of applying those models could be very different than the ones obtained through the use of the Life Cycle Analysis technique (LCA). This paper presents a model that combines the MIVES method with the LCA, solving both mentioned problems.

Keywords: Sustainability; Assessment; MIVES; Life Cycle Analysis; Structural systems

MODELO GENÉRICO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS ESTRUCTURALES.

Hasta la fecha, la EHE y la EAE constituyen la única normativa existente para la evaluación de la sostenibilidad estructural en el ámbito internacional. Los modelos de dichas Instrucciones tienen un conjunto importante de problemas que han sido ya identificados por diversos autores; esto ha provocado un uso escaso de los mismos. Uno de estos problemas es que dichos modelos son específicos de un solo material (hormigón o acero estructurales). Lo anterior impide realizar las oportunas comparaciones. Otro, mucho más importante, es que los resultados de aplicar dichos modelos pueden diferir en mucho con respecto a los resultados obtenidos si se aplica un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). En esta comunicación se presenta un modelo que combina el método MIVES con el ACV, solucionando los dos problemas mencionados.

Palabras clave: Sostenibilidad; Evaluación; MIVES; Análisis de ciclo de vida; Sistemas estructurales

Correspondencia: Alfredo del Caño Gochi alfredo@udc.es ; M. Pilar de la Cruz López pcruz@udc.es

Agradecimientos: El presente trabajo se ha realizado en el marco del proyecto BIA2010-20789-C04-02, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO).

This work has been carried out within the framework of the project BIA2010-20789-C04-02, funded by the Spanish Ministry of Science and Innovation (MINECO).

1. Introducción.

1.1. Antecedentes e introducción.

El método más riguroso para evaluar la sostenibilidad de un sistema o proceso es un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que incluya indicadores medioambientales, sociales y económicos. No obstante, las bases de datos actuales, incluso las más completas, como Ecoinvent, todavía tienen importantes inadecuaciones y falta de datos para bastantes aspectos del ACV, y tanto más en el ámbito social. Adicionalmente, todavía no existen reglas firmes y claras para realizar ACVs, con lo cual diferentes fuentes pueden generar ACVs con resultados que no son homogéneos, aunque deberían llevar a conclusiones similares. Finalmente, incluso en los países más avanzados, la mayoría de los técnicos del sector de la construcción carecen de formación adecuada para realizar ACVs.

Todo ello llevó al enfoque de la Instrucción española de Hormigón Estructural EHE-08, que ha sido pionera al incluir un modelo para la evaluación de la sostenibilidad estructural. Dicho enfoque se basa en la utilización de variables de uso común por parte de los técnicos del sector (así como de un software gratuito puesto a disposición por la administración española), de manera que su aplicación fuese fácil y rápida. La Instrucción española de Acero Estructural (EAE) continuó el trabajo de la EHE-08, generando un modelo parecido para estructuras metálicas. Ambas instrucciones incluyen aspectos medioambientales, sociales y de aumento de la vida útil (durabilidad), con las consecuencias económicas, sociales y ambientales que esto último supone. En ambos casos se trata modelos exclusivos para el material de que se trate; es decir, no permiten realizar comparaciones entre estructuras de materiales diferentes.

El plazo disponible para el desarrollo de la EHE-08 impidió realizar ACVs de contraste que sirvieran para saber si el modelo generado era suficientemente oportuno. Diversos autores (Aguado et al. 2012, Gómez et al. 2013, Mel et al. 2015a, por ejemplo) han reportado diferentes problemas y propuesto soluciones y, en particular, algunos (Mel et al. 2013, 2014a, b, c, d, 2015b) han realizado estudios que han servido para comprobar que dicho modelo no es coherente con un ACV, siendo ésta la raíz de una de las deficiencias del mismo. Los autores ignoran lo que pudiera haber sucedido en el caso de la EAE, pero de la lectura de los estudios que se acaban de citar, que incluyen también el acero, como parte esencial integrante del hormigón estructural, se entiende que el modelo de la EAE tiene los mismos problemas. Por otro lado, y como ya se ha anticipado, los modelos de dichas instrucciones no permiten la comparación entre materiales entre sí, lo cual es una clara desventaja que no tiene el ACV.

Actualmente se está redactando un nuevo Código Estructural español, basado en los Eurocódigos, que sustituirá a ambas instrucciones. Dicho Código incorporará un Anejo de sobre sostenibilidad, cubriendo la carencia que tienen los Eurocódigos en este campo.

1.2. Objetivo.

El principal objetivo de esta comunicación es presentar una primera propuesta de modelo de evaluación de la sostenibilidad sencillo, basado en una combinación del ACV y del método MIVES (usado en la EHE-08 y en la EAE), que permite comparar estructuras de diferentes materiales, al margen de aportar posibles ideas a tener en cuenta en el nuevo Código Estructural español.

Adicionalmente, se incluye en este escrito un ejemplo de aplicación de dicho modelo a la estructura principal de una nave industrial convencional, de dimensiones muy frecuentes en la industria, proyectada con diferentes materiales.

2. Materiales y métodos.

2.1. Método MIVES.

Un ACV produce un listado con los valores que toman los indicadores de sostenibilidad. Tratar de hacer comparaciones basadas en dichos listados no suele resolver nada, ya que cada alternativa bajo comparación tendrá ventajas e inconvenientes con respecto a las demás, y normalmente no habrá una que sólo tenga ventajas sobre el resto. MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible) es un método multicriterio de apoyo en la decisión que permite integrar todos esos valores en uno solo, y se ha usado para crear el modelo aquí propuesto. Este método (Gómez et al., 2012; de la Cruz et al., 2015a) se basa en árboles de requerimientos (Figura 1), funciones de valor (Alarcón et al., 2011) y en el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process: AHP*; Saaty, 2006).

Figura 1: Árbol de requerimientos del modelo utilizado

α_i (%)	Requerims.	β_i (%)	Criterios	γ_i (%)	Indicadores
				70.0	Coste de construcción
23.08	Económico	100	Costes directos	15.0	Coste de mantenimiento
				15.0	Coste de desactivación
				33.0	Energía total consumida
			Energía (67%)	67.0	% de energía renovable
		50	Consumos	9.0	Materiales consumidos
				18.2	% de materiales renovables
			Materiales (33%)	36.4	% de materiales de reciclaje
				36.4	% de reutilizabilidad
46.15	Ambiental			30.7	Efecto invernadero
				7.7	Acidificación
				15.4	Eutrofización
		50	Impactos	7.7	Destrucción ozono estratosf.
				7.7	Contaminación de verano
				15.4	Toxicidad
				15.4	Ecotoxicidad
7.69	Funcional	100	Técnico-funcional	100.0	Flexibilidad ante cambios
				60.0	Facilidad de mantenimiento
		30	Facilidad de trabajo	40.0	Facilidad de disposición final
23.08	Social			65.0	Creación de empleo
		70	Impacto	35.0	Uso de comercio local

Una vez se establece el problema a resolver, que en este caso es comparar alternativas estructurales para un mismo edificio, se crea un árbol de requerimientos (Figura 1) que

refleja los aspectos a tener en cuenta en la evaluación. Es un esquema jerárquico en el cual dichos aspectos se estructuran de manera organizada. Tiene varios niveles, que en este caso son tres: requerimientos, criterios e indicadores (Figura 1). Estos últimos parámetros son las variables a medir, y el resto suponen una ayuda para estructurar el problema, facilitar la comprensión del mismo, y organizar los cálculos.

Las funciones de valor permiten trabajar simultáneamente con indicadores cualitativos y cuantitativos, y sirven para transformar las diferentes magnitudes y unidades de dichos indicadores en un parámetro común adimensional llamado valor o nivel de satisfacción. Esto permite realizar operaciones matemáticas con los indicadores. Las funciones de valor también permiten considerar posibles no-linealidades en la evaluación, dependiendo de la geometría que se les dé. Diferentes geometrías (lineal, cóncavas, convexas o en forma de S) hacen posible establecer diferentes grados de exigencia en el cumplimiento de requisitos de sostenibilidad. A su vez, estas funciones serán crecientes o decrecientes dependiendo de si el aumento en el indicador bajo estudio es, respectivamente, ventajoso o problemático. MIVES utiliza la Ecuación (1) como base para definir las funciones de valor continuas.

$$V_i = \frac{1-e^{-m_i \left(\frac{|P_i - P_{i,min}|}{n_i} \right)^{A_i}}}{1-e^{-m_i \left(\frac{|P_{i,max} - P_{i,min}|}{n_i} \right)^{A_i}}} \quad (1)$$

En la ecuación (1), P_i es el valor de entrada del indicador i , para la alternativa a evaluar. $P_{i,max}$ y $P_{i,min}$ son, respectivamente, los valores de P_i asociados con el mayor y menor nivel de satisfacción, que en este caso son 1 y 0. A_i , n_i y m_i son factores de forma usados para generar funciones de valor con diferentes geometrías (véase Alarcón et al. 2011). Por su parte, como se verá más adelante, para indicadores cualitativos (variables discretas) se usan funciones de valor escalonadas, que asignan un nivel de satisfacción a cada etiqueta semántica usada.

Por lo demás, MIVES está basado en elementos matemáticos de la teoría general de toma de decisiones, en concreto en los métodos de decisión multicriterio (MCDM; véase Gómez et al. 2012 y de la Cruz et al. 2015a). En el caso de árboles con tres niveles, V toma la forma de la Ecuación (2).

$$V(P) = \sum_{i=1}^{i=N} \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i(P_i) \quad (2)$$

En dicha ecuación $V(P)$ mide el valor o nivel de satisfacción de la alternativa evaluada, con respecto al conjunto de indicadores P_i ; α_i y β_i son los pesos de los requerimientos y criterios a los cuales pertenece el indicador P_i ; γ_i son los pesos de los diferentes indicadores; $V_i(P_i)$ son las funciones de valor usadas para medir el valor o nivel de satisfacción de la alternativa bajo estudio respecto a un indicador dado i ; finalmente, N es el número total de indicadores tenidos en cuenta en la evaluación.

El último aspecto clave consiste en definir el peso o importancia relativa de cada aspecto tenido en cuenta en la evaluación. Expertos en la materia deben establecer valores numéricos para α_i , β_i y γ_i . En general, la asignación directa de pesos en ramales de hasta cuatro elementos no genera problemas. Con más de cuatro es frecuente que se pierda la visión de conjunto, lo cual puede llevar a inconsistencias. Al margen de ello, puede haber diferencias de opinión. En esos casos es recomendable usar AHP, que alivia o elimina este tipo de problemas. Este método ha sido aplicado a la evaluación de la sostenibilidad y a la toma de decisiones en campos muy diferentes, entre los que se encuentran la ingeniería de

la construcción y la energía (Aguado et al. 2012, Casanovas et al. 2014, Cartelle et al. 2015, Cuadrado et al. 2015, de la Fuente et al. 2016, entre otros muchos). El lector puede encontrar información adicional sobre MIVES en Gómez et al. (2012; en español) y en de la Cruz et al. (2015a; en inglés).

2.2. Modelo de evaluación.

El modelo propuesto incluye los tres ámbitos esenciales que se derivan del Informe Brundtland (United Nations 1987) y de la Declaración de Río (United Nations 1992), que son el ambiental, el social y el económico. De acuerdo con las tendencias actuales, se ha añadido un cuarto ámbito, de tipo técnico-funcional.

La elección de indicadores y el establecimiento de sus pesos (Figura 1) han sido llevados a cabo por los autores en base a sus propios conocimientos y experiencia, y a consultas con dos expertos del sector que cuentan, respectivamente, con 11 y 33 años de experiencia en ingeniería estructural. Como es lógico, también se han consultado publicaciones científicas sobre el tema y bases de datos de indicadores de sostenibilidad (Pulido 2008, Forde 2009, Mel et al. 2013, 2014c, 2014d, 2015a, 2015b, Guinee 2016, TU Delft 2016, BUNBR 2016, entre otros).

Por el momento, los autores no han podido incluir todos los indicadores que hubieran deseado, por causa de la ausencia de datos con respecto a determinados aspectos. Sin embargo, el modelo es muy completo, y se considera que un conjunto mayor de indicadores debe llevar a conclusiones similares. Tampoco se han incluido, por ahora, posibles indicadores que no sirvan para establecer diferencias entre los tipos estructurales a comparar. Así, por ejemplo, no se ha incluido un indicador de siniestralidad, por considerarse que este factor es esencialmente independiente del material estructural, ya que en todos los casos se trata de estructuras prefabricadas y, por tanto, los procedimientos de ejecución son parecidos y con un nivel de riesgo similar.

El requerimiento económico tiene en cuenta los principales costes a lo largo del ciclo de vida de la estructura, desde la construcción hasta la desactivación. El medioambiental incluye indicadores de consumo energético y de materiales, así como de impactos medioambientales al aire, a las aguas y al suelo, con afección tanto a seres vivos como a objetos inertes. Este conjunto de indicadores constituye un mínimo comúnmente aceptado para un ACV ambiental. Por su parte, el requerimiento social incluye indicadores relacionados con la creación de empleo, el comercio local y la facilidad en la realización de los trabajos. Finalmente, a pesar de su reducido peso, se ha incluido un indicador técnico-funcional, debido a la importancia que tiene la flexibilidad de una estructura con respecto a posibles cambios futuros que pudieran resultar necesarios.

A continuación se incluye una breve descripción de los indicadores considerados, con sus unidades de medida:

- E1. Coste de construcción, en función de los costes totales de inversión para el cliente, expresados en Euros/m².
- E2. Costes generados por el mantenimiento de la estructura (pintura de estructuras de acero, barnices protectores de la madera, otros cuidados periódicos durante el ciclo de vida; parámetro cualitativo; véase la Tabla 2).
- E3. Coste de desactivación de la estructura, al final de su ciclo de vida (parámetro cualitativo; véase la Tabla 2).
- A1. Energía total consumida en el ciclo de vida, expresada en MJ/m², cuya suma va poco más allá de la energía consumida desde la extracción de materias primas hasta la construcción de la estructura.

- A2. Porcentaje de energía renovable sobre el total de energía consumida (A1), que depende del mix energético del país de que se trate.
- A3. Total de materiales consumidos en la estructura, expresado en kg/m^2 .
- A4. Porcentaje de materiales renovables usados en la estructura, sobre el total de materiales consumidos (A3), siempre que se trate de materiales certificados como tal. Es decir, en el caso de la madera, ésta debe tener certificación que garantice que proviene de bosques gestionados de forma sostenible (se corta menos madera que la que se genera).
- A5. Porcentaje de materiales utilizados en la estructura que proceden del reciclaje de otros materiales, sobre el total (A3) de materiales consumidos (acero procedente de reciclaje, árido reciclado).
- A6. Porcentaje de la estructura que se podría reutilizar en un futuro, en el momento de la desactivación.
- A7. Efecto invernadero. Cantidad de vapor de agua, CO_2 , CH_4 , N_2O , CFCs y otras sustancias emitidas que provocan este efecto, a causa de los diferentes procesos del ciclo de vida. Todos los indicadores ambientales se pueden expresar y medir de formas diferentes, y en este caso esto se hace en kg equivalentes de CO_2 (de efectos equivalentes a las propias emisiones de CO_2 más las del resto de emisiones). Su total va poco más allá de las emisiones correspondientes a la extracción, fabricación y construcción; esto es aplicable al resto de impactos ambientales.
- A8. Acidificación del medio ambiente. Cantidad ácidos resultantes de la liberación de NO_x y SO_x que provocan acidificación, emitidos en los diferentes procesos del ciclo de vida, en este caso expresados en kg equivalentes de SO_x .
- A9. Eutrofización. Enriquecimiento en nutrientes (nitrógeno y fósforo) de un ecosistema acuático, que produce aumento de la biomasa (algas que consumen oxígeno), que lleva a una disminución del contenido de O_2 en el agua, desequilibrio del medio ambiente y empobrecimiento de la diversidad, con posibilidad de condiciones anaerobias y extinción de vida aeróbica. Se produce por la emisión de NO_x y PO_4^{3-} , entre otras sustancias, en los diferentes procesos del ciclo de vida. Se puede medir en kg equivalentes de PO_4^{3-} o, como en este caso, en kg equivalentes de NO_x .
- A10. Destrucción de ozono estratosférico. Productos que destruyen la capa de ozono estratosférico, como los clorofluorocarburos (CFC), o los hidroclorofluorocarburos (HCFC), entre otros, emitidos en los diferentes procesos del ciclo de vida. Este indicador se puede medir en kg equivalentes de CFC11, pero en este caso se mide en Ecopuntos por kg de material (TU Delft 2016; puntos adimensionales con escala tal que cada punto supone la milésima parte de la carga ambiental de un habitante europeo medio, en un año).
- A11. Contaminación de verano, o niebla de verano. Formación fotoquímica de ozono en la troposfera (en verano), en los diferentes procesos del ciclo de vida, por reacciones fotoquímicas entre los NO_x y los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV: CH_3CO , C_2H_2 , CH_4 , etc.), o por reacciones del CO. El O_3 es un agente oxidante e irritante para la vegetación y la población. Este indicador se puede medir en kg equivalentes de etileno, pero en este caso se mide en Ecopuntos/kg.
- A12 y A13. Toxicidad y Ecotoxicidad. Cantidad de sustancias tóxicas (Pb y Zn, entre otras), que resultan nocivas, respectivamente, para el ser humano y para su entorno

medioambiental, emitidas en los diferentes procesos del ciclo de vida. Estos indicadores se pueden expresar en kg equivalentes de 1,4 diclorobenceno (DCB), pero en este caso se miden en Ecopuntos/kg.

- F1. Facilidad para realizar cambios futuros en la estructura (parámetro cualitativo; véase la Tabla 2).
- S1. Facilidad para realizar tareas de mantenimiento y reparación en la estructura (parámetro cualitativo; véase la Tabla 2).
- S2. Facilidad con la que se realiza la disposición final de la estructura, al terminar su ciclo de vida (parámetro cualitativo; véase la Tabla 2).
- S3. Creación de empleo para generar la estructura, medido en personas por cada 100 t de material.
- S4. Consumo local, medido en función de la distancia, en km, que recorren los materiales de la estructura desde su fabricación hasta la obra.

En las tablas 1 y 2 se incluyen los parámetros establecidos para las diferentes funciones de valor. En cuanto a los pesos, los de los ramales con menos de cinco elementos se han establecido de manera directa, y para ramales de más de cuatro elementos se ha aplicado AHP. Tanto para las funciones de valor como para los pesos se ha tenido en cuenta la información disponible y las opiniones de las personas participantes en el proceso.

Tabla 1: Parámetros para las funciones de valor continuas

Indicador	Parametros					Geometría
	$P_{i,max}$	$P_{i,min}$	A_i	m_i	n_i	
E1 (€/m ²)	70	200	1	0.01	70	Lineal decreciente
A1(MJ/m ²)	0.01	1.5	1	0.01	0.1	Lineal decreciente
A2 (%)	100	0	1.39	0.56	11	Forma de S creciente
A3 (kg/m ²)	300	650	1	0.01	615	Lineal decreciente
A4 (%)	10	0	0.48	0.5	1	Convexa creciente
A5 (%)	30	0	0.48	1	2.4	Convexa creciente
A6 (%)	100	0	1	0.01	10	Lineal creciente
A7 (kg _e CO ₂ /m ²)	0.001	150	3.48	0.01	150	Cóncava decreciente
A8 (kg _e de SO _x /m ²)	0.001	0.08	1.95	0.01	0.08	Cóncava decreciente
A9 (kg _e de NO _x /m ²)	0.001	1.5	6.2	0.01	1.5	Cóncava decreciente
A10 (Ecopuntos/kg)	0.1	0.4	5.68	0.34	0.4	Cóncava decreciente
A11 (Ecopuntos/kg)	0.05	0.4	3.65	0.3	0.4	Cóncava decreciente
A12 (Ecopuntos/kg)	150	350	2.80	0.02	200	Cóncava decreciente
A13 (Ecopuntos/kg)	0.5	12.5	6.5	0.01	12.5	Cóncava decreciente
S3 (Personas/100t)	10	0	0.39	0.25	4	Convexa creciente
S4 (km)	0	400	6.08	0.33	196	Forma de S decreciente

Tabla 2: Parámetros para las funciones de valor discretas

Indicador	Niveles (valor o nivel de satisfacción)			Geometría
E2	Bajo (0,8)	Medio (0,4)	Alto (0,2)	Escalonada decreciente
E3	Bajo (0,8)	Medio (0,4)	Alto (0,2)	Escalonada decreciente
F1	Baja (0,2)	Media (0,4)	Alta (0,8)	Escalonada creciente
S1	Baja (0,2)	Media (0,4)	Alta (0,8)	Escalonada creciente
S2	Baja (0,2)	Media (0,4)	Alta (0,8)	Escalonada creciente

2.3. Caso práctico. Alternativas que se comparan.

Con el modelo aquí presentado se han evaluado cuatro alternativas para una misma nave industrial cuyas características geométricas y constructivas se explican a continuación. Se trata de una nave de almacenaje exenta y cerrada, sin puente grúa. Se ha optado por un diseño de pórticos o entramados aporticados a dos aguas, con dimensiones en planta de 22 x 42 m. La altura hasta el alero es de 7 m. Dependiendo del tipo estructural utilizado, la altura de coronación varía entre los 7.6 y los 8.1 m, con pendientes de cubierta que van desde el 7.5% hasta el 10%. Cada testero tiene un portón de 5x5 m. En todos los casos se ha considerado que la nave no es ampliable en sus extremos, y por tanto se proyectan pórticos testeros diferentes de los intermedios, para ahorrar en materiales y costes. Se han considerado cerramientos de fachada y cubierta a base de paneles sándwich de 50 mm de espesor. La ubicación de la nave es en el municipio de Ferrol (Coruña). Las soluciones de estructura principal cuya sostenibilidad se evalúa son las siguientes:

- Estructura con código E1met, de acero (Lourés, 2011). Se proyectan 8 pórticos intermedios bi-empotrados y testeros con soportes intermedios, todo ello en acero S275. Los pórticos intermedios están constituidos por dinteles IPE 330 y soportes IPE 450, con acartelamientos en las uniones entre dinteles, y entre dintel y soporte, y con tornapuntas L60x60x6 cada dos correas de cubierta (3,5 m). Los testeros están compuestos por dinteles IPE 200, soportes extremos IPE 360 y tres soportes intermedios IPE 200. Cada vano extremo de la nave se arriostra con seis cruces de San Andrés (una en cada fachada y cuatro en cubierta), con varilla de Ø16 mm. Las zapatas de pórticos intermedios miden 210x380x85 cm, las zapatas extremas de los testeros miden 225x225x60 cm, y las intermedias de dichos testeros 160x160x40 cm. Las vigas de atado perimetrales son de 40x40 cm. Todas las cimentaciones son de hormigón HA-25, armadas con acero B400-S. La estructura principal supone un peso de 18.586,58 kg de acero. Por su parte, las cimentaciones suponen un total de 3.192,36 kg de acero, 238.600,00 kg de hormigón estructural y 31.800,00 kg de hormigón de limpieza.
- Estructura con código E2met, de acero (Fernández, 2014). Similar a la anterior pero más afinada. Los materiales y tipo estructural son los mismos, pero en este caso se disponen 7 pórticos intermedios con dinteles IPE 300 y soportes IPE 400. Las restantes diferencias son: testeros con dinteles IPE 160 y soportes extremos IPE 330 (los intermedios son iguales, IPE 200); mismas cruces de San Andrés, pero ahora con varillas de Ø10 mm, Ø14 mm y Ø18 mm. Las zapatas de los pórticos intermedios miden 255x359x95 cm, las zapatas extremas de los testeros miden 211x211x80 cm, las zapatas centrales de los mismos 135x155x50 cm, y las restantes zapatas de dichos testeros miden 115x162x50 cm. La estructura principal supone un peso de 13.777,7 kg

de acero. Por su parte, las cimentaciones suponen un total de 3.250,86 kg de acero, 245.200,00 kg de hormigón estructural y 28.050,00 kg de hormigón de limpieza.

- Estructura con código E3mle-h de madera laminada encolada (MLE) con soportes de hormigón armado (HA) (Lourés, 2011). Se proyectan dinteles de MLE bi-apoyados sobre pilares de HA empotrados en la cimentación. Los pilares de los pórticos de intermedios y de las esquinas son de sección 50x50 cm, y los restantes soportes de los testeros son de 35x35 cm, todos ellos de hormigón HA-25. Los dinteles de los pórticos intermedios son de MLE gl28h de perfil RV-140 (H:750/1575), y los de los testeros de perfil V-240x240, del mismo material. Se disponen cruces de San Andrés con varilla de acero S275J de Ø16 mm y vigas de MLE gl28h. Toda la madera está certificada FSC (*Forest Stewardship Council*). Las zapatas de pórticos intermedios miden 200x380x85 cm, las zapatas extremas de los testeros miden 260x260x70 cm, y las intermedias de dichos testeros miden 280x280x105 cm. Las vigas de atado perimetrales son de 40x40 cm. Todas las cimentaciones son de hormigón HA-25, armadas con acero B400S. La estructura principal supone un peso de 101.972,21 kg de acero. Por su parte, las cimentaciones suponen un total de 5.688,84 kg de acero, 395.350,00 kg de hormigón estructural y 49.000,00 kg de hormigón de limpieza
- Estructura con código E4horm de hormigón prefabricado (Precon, 2011). Se trata de una nave en la cual la empresa prefabricadora ha tratado de minimizar materiales y costes. Se compone de entramados aporricados intermedios de vigas pretensadas bi-apoyadas sobre pilares de 40x40 cm de hormigón H-30, empotrados en cimentación. Dichas vigas son peraltadas y aligeradas, tipo PA-160, de hormigón HP-40, con armadura pasiva B-500S y activa Y-1860S7. Su pendiente es del 10%, con canto total variando entre 0,45 y 1,60 m. En cada testero se disponen 5 pilares de 40x40 cm, de hormigón H-30, sobre los que descansan vigas tipo VC 14x30. La nave se arriostra mediante vigas tipo I-19 de hormigón H-30. Las zapatas de los pórticos intermedios miden 160x160x60 cm y las de los testeros miden 140x140x60 cm. Las vigas de atado perimetrales son de 40x40 cm. Todas las cimentaciones son de hormigón HA-25, armadas con acero B400S. La estructura principal supone un peso de 53.188,6 kg de hormigón H-40, 62.024,0 kg de hormigón H-30, 3.708,51 kg de armadura pasiva y 2176,5 kg de armadura activa. Por su parte, las cimentaciones suponen un total de 3.057,45 kg de acero, 115.706,00 kg de hormigón estructural y 22.580,00 kg de hormigón de limpieza.

Todos los aceros utilizados proceden de reciclaje, que es lo habitual en España. En la Tabla 3 se muestran los valores que toman los indicadores para cada una de las cuatro estructuras que se acaban de resumir, así como el correspondiente valor o índice de satisfacción que resulta de aplicar las funciones de valor, antes definidas, al valor que toma cada indicador, aplicando fórmula (1) con los datos de la Tabla 1 para las funciones continuas, y con los datos de la Tabla 2 para las discretas.

3. Resultados y discusión.

Aplicando la fórmula (2), con los pesos de la Figura 1, a los resultados de la Tabla 3 (a los datos de las columnas denominadas "Valor", en las que se consigna el índice de satisfacción para cada indicador), se obtienen los índices globales de sostenibilidad de cada alternativa. En la Tabla 4 se muestran dichos resultados globales, y también los resultados parciales para los cuatro pilares ambiental, social, económico y funcional de la sostenibilidad.

Tabla 3: Resultados de mediciones y nivel de satisfacción (valor) de cada indicador

Indicador	Alternativas que se comparan (cuatro estructuras para la misma nave)							
	E1met		E2met		E3mle-h		E4horm	
	Medición	Valor	Medición	Valor	Medición	Valor	Medición	Valor
E1 (€/m ²)	115.2	0.67	108.3	0.72	164.0	0.29	82.9	0.91
E2 (cualitativo)	Bajo	0.80	Bajo	0.80	Medio	0.40	Bajo	0.80
E3 (cualitativo)	Bajo	0.80	Bajo	0.80	Medio	0.80	Medio	0.40
A1(MJ/m ²)	0.73	0.53	0.70	0.56	0.75	0.52	1.00	0.35
A2 (%)	24.7	0.82	24.7	0.82	24.7	0.82	24.7	0.82
A3 (kg/m ²)	381.0	0.77	384.0	0.76	545.6	0.30	591.8	0.17
A4 (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	0.95	0.00	0.00
A5 (%)	22.6	0.98	22.0	0.98	16.5	0.95	21.4	0.98
A6 (%)	100	1.00	100	1.00	27.4	0.28	60.1	0.61
A7 (kg _e CO ₂ /m ²)	69.2	0.12	67.3	0.13	81.4	0.07	99.6	0.02
A8 (kg _e de SO _x /m ²)	0.043	0.23	0.041	0.25	0.068	0.03	0.052	0.13
A9 (kg _e de NO _x /m ²)	0.509	0.08	0.482	0.09	0.604	0.04	0.627	0.04
A10 (Ecopuntos/kg)	0.161	0.28	0.155	0.32	0.276	0.01	0.137	0.18
A11 (Ecopuntos/kg)	0.172	0.21	0.159	0.26	0.099	0.57	0.221	0.09
A12 (Ecopuntos/kg)	289.2	0.04	267.9	1.00	304.5	0.02	217.0	0.32
A13 (Ecopuntos/kg)	1.15	0.70	1.08	0.72	10.08	0.00	0.92	0.79
F1 (cualitativo)	Alta	0.80	Alta	0.80	Media	0.40	Media	0.40
S1 (cualitativo)	Alta	0.80	Alta	0.80	Media	0.40	Media	0.80
S2 (cualitativo)	Alta	0.80	Alta	0.80	Media	0.80	Alta	0.40
S3 (Personas/100t)	1	0.45	1	0.45	3	0.67	1	0.45
S4 (km)	60.8	1.00	60.8	1.00	221.1	0.40	72.7	1.00

Tabla 4: Índices de sostenibilidad globales y parciales de cada alternativa

Índices	Alternativas que se comparan			
	E1met	E2met	E3mle-h	E4horm
Global	0.61	0.65	0.42	0.57
Medioambiental	0.22	0.26	0.18	0.20
Social	0.16	0.16	0.12	0.15
Económico	0.16	0.17	0.09	0.19
Funcional	0.06	0.06	0.03	0.03

A la vista de estos resultados, las dos estructuras de acero alcanzan un índice de sostenibilidad global (ISg) mayor que las demás. A su vez, para una estructura de un mismo material, cuanto más se afina en el cálculo, más sostenible es la solución. En segundo lugar queda la estructura de hormigón prefabricada con dinteles pretensados, y en último lugar la estructura de MLE con soportes de hormigón. Esto puede parecer contra-intuitivo pero, al margen de las diferencias que hay con respecto a cantidades de materiales en cimentaciones, la estructura de MLE se ve penalizada por el hormigón usado en los pilares, y esto hace que el ISg sea menor. En todo caso, como se puede observar, las diferencias entre los diferentes ISg's no son muy grandes. Resulta lógico pensar que una estructura íntegramente realizada en MLE debe alcanzar mayores niveles de sostenibilidad que cualquiera de las aquí analizadas; también habría que analizar el ISg de estructuras de acero más ligeras que las aquí estudiadas, por ejemplo en base a celosías. Esta es una de las posibles líneas de trabajo futuras.

Pasando a los índices parciales, en el requerimiento medioambiental la clasificación es la misma que para el ISg. Siendo una tonelada de acero más impactante sobre el planeta que una tonelada de hormigón, la relación resistencia / peso específico del acero es la mejor de todos los materiales estructurales, lo cual lleva a esta ventaja sobre el hormigón. En el caso de la estructura de MLE sobre soportes de hormigón, el problema es el mismo de antes. De todas formas, las diferencias entre unas y otras alternativas son aquí todavía más reducidas. En el requerimiento social, como se puede ver, las diferencias son escasas. Finalmente, en el requerimiento funcional, el acero ofrece más flexibilidad ante cambios futuros (corte, perforado, soldadura) que la madera y el hormigón (que no pueden soldarse); de todas formas (Figura 1), esto no influye de manera relevante en los resultados globales, dado el peso de este requerimiento.

4. Conclusiones y trabajos futuros.

Se ha presentado aquí una primera propuesta de modelo genérico híbrido ACV-MIVES, que permite comparar el nivel de sostenibilidad de estructuras de diferentes materiales. El modelo presentado es muy completo, y se considera que un conjunto mayor de indicadores debe llevar a conclusiones similares. Los resultados de su aplicación a cuatro estructuras diferentes resultan de interés, y llevan a pensar en la vuelta a un pasado en el cual el proyectista trataba de diseñar la estructura más ligera que le fuese posible, algo que hoy en día se ve modificado a causa de los costes de mano de obra correspondientes a determinados tipos estructurales. En el caso de aplicación sólo se ha tenido en cuenta la estructura principal, pero si se considerase también la estructura secundaria los resultados deberían ser análogos, disminuyendo las diferencias entre la estructura E3mle-h y las restantes alternativas, al ser toda esa estructura secundaria de MLE. En otro orden de cosas, los bajos índices registrados para las cuatro alternativas demuestran que se trata de un modelo exigente.

Con respecto a futuros desarrollos, se considera que, por un lado, debe ampliarse el catálogo de indicadores y de alternativas estructurales a analizar, tal como se ha anticipado. Por otro, hay que tener en cuenta que existe incertidumbre en cuanto a los valores que realmente pueden tomar en un caso real los diferentes indicadores y, además, existe o puede existir cierta subjetividad a la hora de establecer pesos y funciones de valor. Por tanto, se considera necesario ampliar el modelo con técnicas de simulación estocástica (de la Cruz et al. 2015a) o de aritmética difusa (de la Cruz et al. 2015b), para analizar la incertidumbre y reducir o anular la subjetividad.

Referencias

- Aguado, A., del Caño, A., de la Cruz, M.P., Gómez, D., Josa, A. (2012). Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code. *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, nº 138(2), pp. 268-276.
- Alarcón, B., Aguado, A., Manga, R., & Josa, A. (2011). A value function for assessing sustainability: Application to industrial buildings. *Sustainability*, 3(1), 35-50.
- BUNBR (2016). Ökobaudat. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BUNBR; Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear; Alemania). Base de datos para la evaluación del ciclo de vida de materiales de construcción. Consultado por última vez en abril de 2016. Disponible en línea en: <http://www.oekobaudat.de/>
- Cartelle, J.J., Lara, M., de la Cruz, M.P., del Caño, A. (2015). Assessing the global sustainability of different electricity generation systems. *Energy* 89, 473-489.
- Casanovas, M.M., Armengou, J., Ramos, G. Occupational risk index for assessment of risk in construction work by activity. *Manage Constr Eng J* 2014; 10(3): 1-9. 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000785.
- Cuadrado, J., Zubizarreta, M., Pelaz, B., Marcos, I. Methodology to assess the environmental sustainability of timber structures. *Construction and Building Materials* 2015; 86: 149–158
- de la Cruz, M.P., Castro, A., del Caño, A., Gómez, D., Lara, M., Cartelle J.J. (2015a). Comprehensive methods for dealing with uncertainty in assessing sustainability. Part I: the MIVES – Monte Carlo method. In: *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency*. Eds: MS García-Cascales, JM Sánchez-Lozano, AD Masegosa, C. Cruz-Corona. *IGI-Global (USA). Chapter 4*, pp. 69-106.
- de la Cruz, M.P., Castro, A., del Caño, A., Gómez, D., Lara, M., Gradaille, G. (2015b). Comprehensive methods for dealing with uncertainty in assessing sustainability. Part II: the Fuzzy-MIVES method. In: *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency*. Eds: MS García-Cascales, JM Sánchez-Lozano, AD Masegosa, C. Cruz-Corona. *IGI-Global (USA). Chapter 5*, pp. 107-140.
- de la Fuente, A., Pons, O., Josa, A., Aguado, A. Multi-criteria decision making in the sustainability assessment of sewerage pipe systems. *Journal of Cleaner Production* 2016; 112(5): 4762-4770. 10.1016 / j.jclepro.2015.07.002
- Fernández, M. (2014). *Análisis comparativo del nivel de sostenibilidad de diferentes tipos de estructura para una nave industrial*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior. Universidade da Coruña.
- Forde, M. (2009). *ICE Manual of construction materials (Vols. I & II)*. Thomas Telford. Londres (Reino Unido).
- Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2013). Estimación temprana del nivel de sostenibilidad de estructuras de hormigón, en el marco de la instrucción española EHE-08. *Informes de la Construcción. CSIC. Instituto Eduardo Torroja. Vol. 65, nº 529 (enero-marzo)*, pp. 65-76. doi: 10.3989/ic.11.123.
- Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, MP., Josa, A. (2012). Metodología genérica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos. El método MIVES. En: *Sostenibilidad y construcción*. Editor: A. Aguado. *Asociación Científico-Técnica del Hormigón (ACHE). Cap. 18*, pp. 385-411.
- Guinee J. (2001). *Abiotic resource depletion in LCA*. Universidad de Leiden. Consultado por última vez en abril de 2016 en: <http://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/science/cml-abiotic-depletion-in-lcia>
- Lourés, X. (2011). *Análisis comparativo, a efectos de algunos parámetros de sostenibilidad de tipos frecuentes de estructuras para naves industriales*. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Politécnica Superior. Universidade da Coruña.

- Mel J, Gómez D, del Caño A, de la Cruz MP, Aguado A, Josa A (2015a). Propuestas para la mejora del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la Instrucción española de hormigón estructural. *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 19th International Congress on Project Management and Engineering, Granada (Spain), 15-17 July 2015*, pp. 02-004-1/02-004-12.
- Mel, J, del Caño, A, de la Cruz, M.P. (2013). Análisis del consumo energético y de las emisiones de CO2 en la construcción de estructuras de hormigón en España. *Dyna*, nº 88(1) (febrero 2013), pp. 59-67.
- Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2014a). Sostenibilidad en la fabricación de cemento en España: análisis del consumo energético y de las emisiones de CO2. *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering, Alcañiz (Spain), 16-18 July, 2014*, pp. 02-001-1/16.
- Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2014b). Sostenibilidad en la producción de árido granítico en el noroeste de España: consumo energético y emisiones de CO2. *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering, Alcañiz (Spain), 16-18 July, 2014*, pp. 02-002-1/12.
- Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2014c). Sostenibilidad en la fabricación de armaduras de acero en España: análisis del consumo energético y de las emisiones de CO2. *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering, Alcañiz (Spain), 16-18 July, 2014*, pp. 02-003-1/9.
- Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2014d). Sostenibilidad en la preparación y puesta en obra de hormigón en España: análisis de consumo energético y emisiones de CO2. *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering, Alcañiz (Spain), 16-18 July, 2014*, pp. 02-004-1/12.
- Mel, J., Gómez, D., de la Cruz, P., del Caño, A. (2015b). Análisis de sensibilidad y estudio crítico del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la Instrucción Española de Hormigón Estructural. *Informes de la Construcción (CSIC)*, 67(539): e106, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.126>.
- Precon (2011). Comunicación interna gentileza de la empresa Precon, S.A. con el proyecto de una estructura de hormigón prefabricado con vigas peraltadas aligeradas pretensadas bi-apoyadas sobre pilares de hormigón armado.
- Pulido, A.E. (2008). *Optimización de los pavimentos industriales desde una perspectiva sostenible y aplicación de la herramienta MIVES*. Tesis Doctoral no publicada, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Saaty, T. (2006). *Fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburg: RWS Publications.
- TU Delft (2016). *The Model of the Eco-costs / Value Ratio (EVR)*. Página Web de la Delft University of Technology (Delft, Holanda). Consultado por última vez en abril de 2016. Obtenido de: <http://www.ecocostsvalue.com/EVR/model/theory/subject/5-data.html>
- United Nations (1987). *Our common future*. World commission on environment and development. 1st ed. Oxford, UK: Oxford University Press.
- United Nations. The Rio Declaration on Environment and Development. *The United Nations Conference on Environment and Development (UNCED); 1992 June 3-14; Rio of Janeiro, Brazil*. Consultado por última vez en enero de 2014. Obtenido de: <http://www.un.org/documents/ga/conf151/aconf15126-1annex1.htm>.