

ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DE DOS SISTEMAS ESTRUCTURALES PORTICADOS Y LA DEFINICIÓN DE SU UNIDAD FUNCIONAL

PARÍS, ORIOL¹; BORDONADA, ROBERT²; CABALLERO, ANTONI³

1: Departamento de Construcciones Arquitectónicas II

Universidad Politécnica de Catalunya

e-mail: oriol.paris-viviana@upc.edu, web: <http://cradletofuture.blogspot.com.es>

2: Estudiante

Universidad Politécnica de Catalunya

e-mail: robert.bordonada@estudiant.upc.edu,

3: Departamento de Construcciones Arquitectónicas II

Universidad Politécnica de Catalunya

e-mail: antoni.caballero@upc.edu, web: <https://www.epseb.upc.edu>

Palabras clave: optimización estructural; unidad funcional; impacto ambiental; reutilización; análisis del ciclo de vida.

RESUMEN

Los sistemas estructurales y de cimentación de un edificio, son responsables de entre el 40 y el 50% del impacto global y del 30% en términos de peso. Las principales causas de este impacto son tanto el tipo de material como la cantidad empleada en el conjunto del edificio. La unidad funcional utilizada en la mayoría de Análisis de Ciclo de Vida del edificio queda referenciada al m² de superficie, pero esta unidad funcional es poco precisa y representativa de una edificación que es volumétrica y penaliza los resultados para edificaciones de mayor altura entre plantas frente a las otras. En el estudio se incorpora la unidad funcional por m³ puesto que refleja con mayor precisión los ratios de impacto de los sistemas en la arquitectura.

Como veremos, el rediseño de los edificios en términos de impacto ambiental deben hacerse de arriba abajo y no al revés, es decir desde el edificio y la estrategia aplicada a los sistemas constructivos y no desde los materiales y sus impactos, consiguiendo de este modo mayores márgenes de mejora medioambiental. Decidir si un sistema estructural debe ser mural, porticado o mixto o si su comportamiento debe

ser hiperestático o isostático siempre es más determinante que decidir si este debe realizarse con madera, cerámica, acero u hormigón.

Lo que determina la sostenibilidad de un sistema constructivo está más relacionado con las prestaciones del material en servicio que con el impacto ambiental por unidad de kilogramo. En el estudio se han comparado cuatro sistemas estructurales porticados de luces entre 1 y 10 metros bajo las mismas sollicitaciones y sometidos los resultados a la unidad funcional por m³ de habitabilidad, con el fin de relativizar el valor del impacto ambiental unitario del material como valor de referencia de la sostenibilidad de los sistemas constructivos.

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción constituye entre el 30-40% de la demanda total de energía de nuestra sociedad [1], tanto en uso como en construcción de la habitabilidad. Aproximadamente el 40% de los recursos utilizados en nuestra sociedad dan respuesta a la construcción de la edificación [2]. Los impactos ambientales asociados a lo largo de la vida útil de un edificio para 50 o 60 años según estudio, se distribuyen entre un 25-35% debido a la construcción y un 65-75% debido al uso de sus espacios [3] [4]. En los países europeos, las leyes nacionales y las directivas de la Unión Europea [5] han introducido recientemente límites y restricciones en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Como es previsible a lo largo del tiempo, los impactos derivados del uso del edificio irán disminuyendo así como la demanda energética de los edificios situando en este escenario al agotamiento de recursos materiales como el principal factor a tener en cuenta para la sostenibilidad del sector de la edificación [5][6]. Entendiendo el edificio como un producto complejo a evaluar podemos afirmar que de los distintos subsistemas que comprenden el edificio (estructura, envolvente, divisorias, etc.) la estructura representa entre 35-50% (según tipología) del conjunto de los impactos de un edificio sin contabilizar las plantas bajo rasante [7].

Los edificios tienen ciclos de vida complejos, ya que están hechos de diferentes materiales, elementos y sistemas constructivos con una larga vida útil y por lo tanto la aplicación de los procedimientos de Ciclo de Vida (ACV) puede no ser sencillo, planteando dificultades e incertidumbres. Pero a pesar de esto, a día de hoy ya podemos aplicar una evaluación de los impactos del edificio a todos los niveles, tanto desde el punto de vista de los materiales y productos (ISO 14040) como desde el punto de vista del edificio (UNE-EN 15978:2012). En este caso, una visión holística del edificio nos obliga a entenderlo como un servicio para la habitabilidad que utilizará recursos del medio para dar respuesta a esta necesidad o demanda.

Una vez conocidos los impactos de un edificio debemos rediseñarlo. Este rediseño puede orientarse de dos modos, el enfoque de abajo arriba se centra sobre todo en la elección de los materiales en función de sus impactos ambientales, en este sentido el desarrollo de Ecoetiquetas Tipo III nos da ahora una información fiel de los impactos de algunos elementos constructivos que nos permite tomar decisiones a la hora de elegirlos para los proyectos.

Pero un enfoque de arriba abajo contempla aspectos más amplios y complejos que los materiales, de hecho se centra sobre todo en los sistemas constructivos y considera la fase de fin de vida útil desde el diseño inicial. La reversibilidad o reutilización de

los sistemas o la optimización y la robustez de estos, son aspectos que se deberían tener en cuenta desde las primeras fases de diseño de los edificios ya que tienen una enorme repercusión en los resultados finales de un ACV [8].

2. OBJETIVOS

Esta ponencia presenta la evaluación del impacto ambiental de cuatro sistemas estructurales basados en acero y hormigón armado para edificios de viviendas en términos de optimización en función de la luz entre los pórticos.

El objetivo del presente estudio es demostrar que los impactos ambientales de los sistemas constructivos dependen sobretodo de las estrategias estructurales del sistema y del comportamiento del material frente a las solicitaciones requeridas. El impacto ambiental de un sistema constructivo no es directamente proporcional al impacto ambiental unitario del material utilizado, sino que dependen de su puesta en servicio dentro del sistema.

3. METODOLOGÍA

Para realizar el análisis que nos permita ver la relación entre del impacto ambiental por unidad de material (kg) y el impacto global del sistema hemos desarrollado un modelo tridimensional de referencia (Figura 2) que utilizaremos como base para el estudio de los distintos escenarios del cálculo. Se han calculado dos sistemas estructurales, el primero basado en la tecnología del hormigón armado y el segundo en la tecnología del acero laminado con perfiles comerciales. En ambos casos considerando un comportamiento hiperestático e isostático del modelo. Una vez calculados los distintos escenarios combinados descritos en la Tabla 2 se realizan las mediciones en peso de los distintos elementos constructivos y del conjunto de cada sistema y posteriormente se han multiplicado los resultados por los valores de impacto ambiental unitarios.

3.1. HERRAMIENTAS DE CÁLCULO Y LÍMITES DEL ACV

Para el cálculo y dimensionado de los modelos estructurales se ha utilizado el programa Tricalc v.7.5 de Arktec, programa de elementos finitos especializado en la comprobación y verificación estructural, que facilita el cambio de materiales estructurales, y mejora su comparativo. Para el cálculo de impactos ambientales se ha utilizado la base de datos BEDEC [9] del ITEC basada en ECOINVENT, con un análisis ambiental tipo 'cradle to gate'. Los valores utilizados descritos en la Tabla 1 incorporan un porcentaje referente al transporte de materiales a 30 km de distancia. En varios estudios se ha utilizado esta misma metodología de cuantificación pero en emisiones de CO₂ para los sistemas constructivos [10] y más específicamente para elementos estructurales en edificación [11].

Tabla 1. Valores de energía y emisiones consideradas. Referenciados a Kg de material.
Fuente: base de datos BEDEC

MATERIALES	unidad	Energía (MJ)	Emisiones (CO ₂)
Hormigón Fck 30N/mm ²	Kg	0,63 MJ/kg	0,12 Kg CO ₂ /kg
Acero corrugado B500S	Kg	37,18 MJ/kg	3,00 Kg CO ₂ /kg
Encofrado metálico (*referenciado a Kg de hormigón)	m ²	0,56 MJ/kg*	0,05 Kg CO ₂ /kg*
Acero Laminado S275JR	Kg	41,50 MJ/kg	4,00 Kg CO ₂ /kg
Acero para elementos de unión S275JR	Kg	41,50 MJ/kg	4,00 Kg CO ₂ /kg

3.2 EL m³ COMO ‘UNIDAD FUNCIONAL’ PARA EL ANÁLISIS

La unidad funcional de un análisis de ciclo de vida es la unidad que permite la correcta comparación de distintos productos o servicios (UNE-EN 15643-1). El edificio puede entenderse como un producto complejo que en función de la escala de análisis puede tener distintas unidades funcionales según se esté analizando materiales, elementos o sistemas constructivos. Si bien es habitual en edificación utilizar el m² como unidad funcional tanto para las mediciones como para los análisis de ciclo de vida, en este estudio se ha considerado la unidad funcional en m³.

Cuando el producto que comparamos es un elemento o sistema constructivo de dos dimensiones predominantes, como podrían ser sistema de fachada o pavimentos, la unidad funcional por m² si es prestacional, es adecuada. Pero cuando lo que queremos comprar es el edificio como unidad de habitabilidad, deberíamos utilizar el m³ puesto que es más precisa si queremos tomar los resultados como ratios comparativos entre distintas edificaciones. El reflejo de los resultados en m², penaliza a las edificaciones de mayor altura entre plantas frente a las de menor altura como puede verse en la Figura 1 donde las superficies totales de ambos edificios son las mismas pero no lo son los volúmenes.

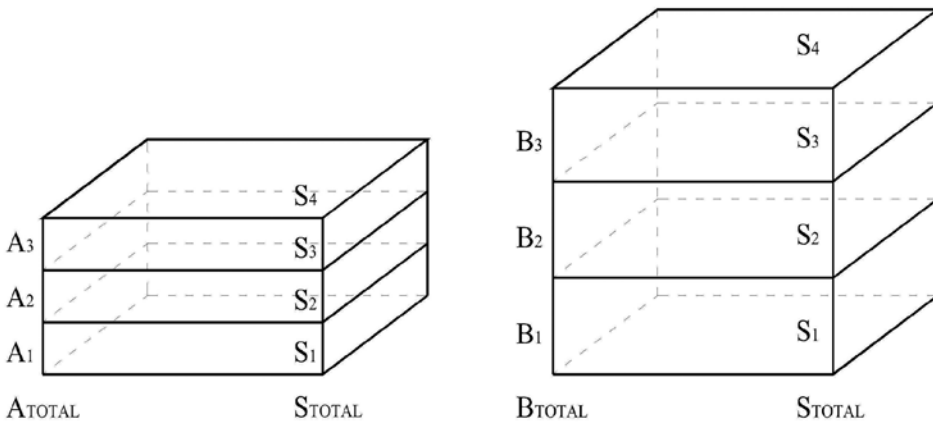


Figura 1. Esquema de la repercusión de los ratios de superficie respecto al volumen.
Fuente: elaboración propia

Una edificación de mayor volumen utiliza mayor cantidad de materiales a pesar que su repercusión en planta (m^2) sea la misma. En este sentido y concretamente para los impactos ambientales de las estructuras, efectos como el pandeo de pilares o los esfuerzos horizontales de viento, no quedan correctamente reflejados en unidades funcionales por m^2 y los resultados comparativos, no son precisos. En términos de sostenibilidad ambiental, económica y social, debemos tener en cuenta que la calidad de los espacios interiores depende en gran medida del volumen y lógicamente de su altura.

3.3 EL MODELO DE REFERENCIA Y LOS ESCENARIOS ANALIZADOS

Geométricamente, el modelo de referencia está caracterizado por una planta rectangular formada por 3 pórticos de 3 vanos en un sentido y por 4 pórticos de 2 vanos en el otro. La altura libre de los pórticos es de 3 metros por 3 plantas (Figura 2).

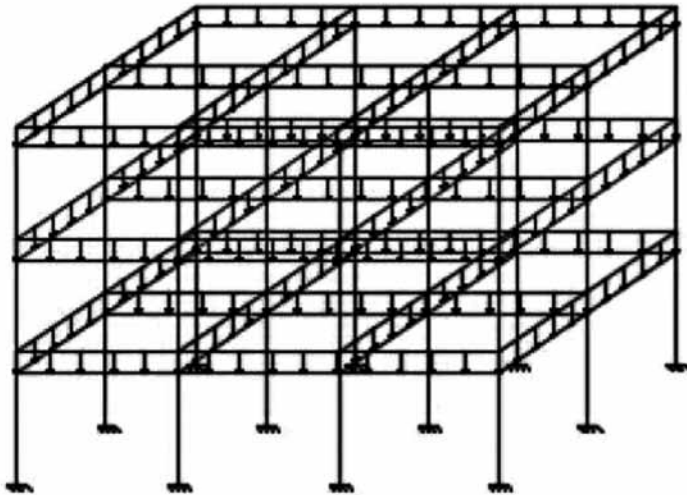


Figura 2. Modelo de referencia. Fuente: elaboración propia

Manteniendo la proporcionalidad geométrica en planta, la única variable considerada ha sido la luz de los pórticos, que por motivos de trazabilidad de los resultados se ha considerado un rango de luces de entre 1-10 m. En todas las hipótesis, la altura libre entre las plantas se mantiene constante. No se han contemplado elementos como techos o forjados puesto que incorporarían demasiadas variables al estudio y podría distorsionar los resultados. Se ha dejado fuera del estudio la influencia de la acción de sismo, pero se han considerado las acciones de viento en una situación urbana.

En el estudio hemos planteado 4 escenarios posibles fruto de la combinación entre un comportamiento hiperestático o isostático y entre un sistema de estructura de acero o de hormigón armado obteniendo un total de 40 simulaciones distintas debido al rango de luces de los pórticos (Tabla 2).

Tabla 2. Escenarios calculados según luces de pórticos. Fuente: elaboración propia

Tecnologías	Sistema Isostático	Sistema Hiperestático	Rango de luces	ESCENARIOS
Hormigón armado	-	X	1-10m	HA Hiperestático
Hormigón armado	X	-	1-10m	HA Isostático
Acero	-	X	1-10m	Acero Hiperestático
Acero	X	-	1-10m	Acero Isostático

3.4 NORMATIVA UTILIZADA

Para el cálculo de los distintos escenarios se ha utilizado el Código Técnico de la Edificación y la Instrucción de Hormigón Armado Estructural. Los documentos utilizados son el DB SE para el cálculo general, el DB SE-AE para acciones en la edificación, el DB SE-A y EAE-12 para estructuras de acero y finalmente para el dimensionado de hormigón armado la EHE-08. Respecto a las cargas, el peso propio se ha escogido según dimensiones obtenidas excepto para los techos que se ha tomado un valor medio constante, el resto de cargas permanentes según Anejo C del DB SE-AE, las cargas variables de viento y nieve según Anejo D para edificaciones urbanas del DB SE-AE. En nuestro análisis no se han tenido en cuenta ni cargas sísmicas ni acciones térmicas. Las limitaciones de desplomes laterales, flechas y coeficientes de seguridad cumplen las condiciones establecidas en el DB SE.

3.5 SISTEMAS DE ARRIOSTRAMIENTO HORIZONTAL

Puesto que el modelo de referencia no dispone de ningún elemento externo o interno para mejorar su comportamiento frente acciones horizontales, para los escenarios isostáticos se han definido sistemas de arriostramiento según tecnologías del sistema estructural. Para el sistema de hormigón armado se ha previsto la colocación de pantallas de hormigón armado y para el sistema de acero se han previsto cruces de ‘San Andrés’ a base de perfiles delgados de acero trabajando a tracción (Figura 3). En ambos casos se han buscado soluciones propias de la tecnología del sistema. En cambio, las estructuras hiperestáticas lo realizan a partir del concepto de nudos rígidos.

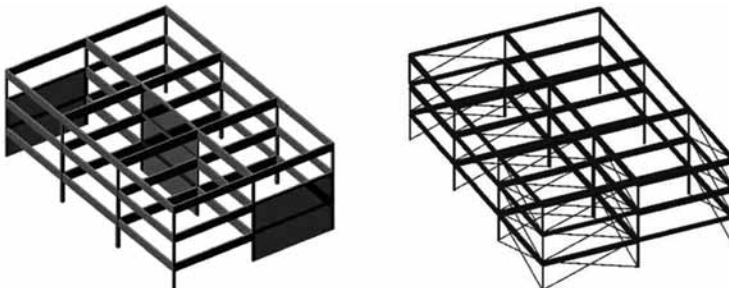


Figura 3. Sistema de arriostramiento para hormigón (izquierda) y acero (derecha).

Fuente: elaboración propia

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan algunos de los resultados más significativos de la investigación basados en la energía embebida de los materiales y ordenados según tres criterios de interpretación.

4.1 EL PESO DEL SISTEMA EN FUNCIÓN DEL MATERIAL

Como ya podíamos suponer y validamos en las Figuras 4 y 5 los sistemas estructurales hiperestáticos representan soluciones más ligeras que las soluciones isostáticas en todo el rango de luces analizadas, exceptuando los primeros tramos de luz hasta los 4 metros del modelo de acero (Figura 5). La influencia del peso de los sistemas de rigidización a las acciones horizontales de la estructura a través de mecanismos propios del sistema tienen una elevada repercusión en el peso total del conjunto sobre todo en las soluciones de hormigón armado mediante las pantallas de hormigón en los dos sentidos.

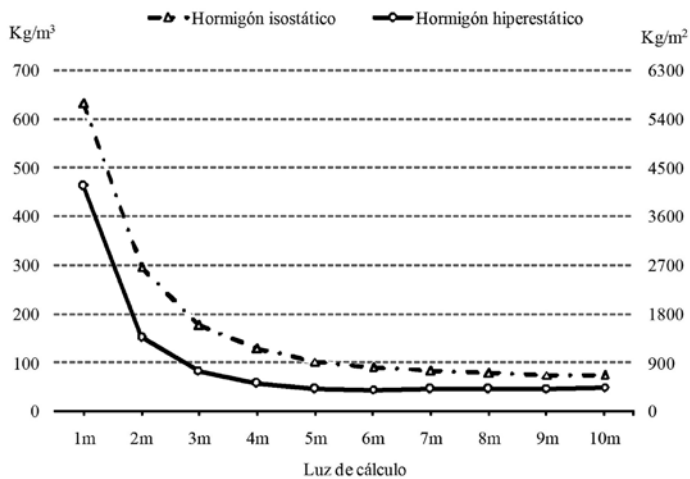


Figura 4. Hormigón. Comparación por pesos. Fuente: elaboración propia

Como vemos en la Figura 4, los sistemas basados en hormigón la curva del peso se estabiliza a medida que aumenta la luz de los pórticos. En cambio, los sistemas de acero aumentan significativamente el peso de la estructura a medida que aumenta la luz de los pórticos (Figura 5). Esto es debido a que los sistemas de hormigón armado necesitan de unas dimensiones mínimas para recubrimientos de armados que impiden optimizar las secciones eficaces en los sistemas de luces pequeñas. La tecnología del acero permite optimizar mejor a pesar del uso de perfiles comerciales.

Si comparamos ambos sistemas a la vez, hormigón armado y acero, vemos como de media para luces de 4 metros los sistemas de hormigón pesan alrededor de 4 veces más que los de acero y para luces de 10 metros esta relación aumenta hasta 12 veces más.

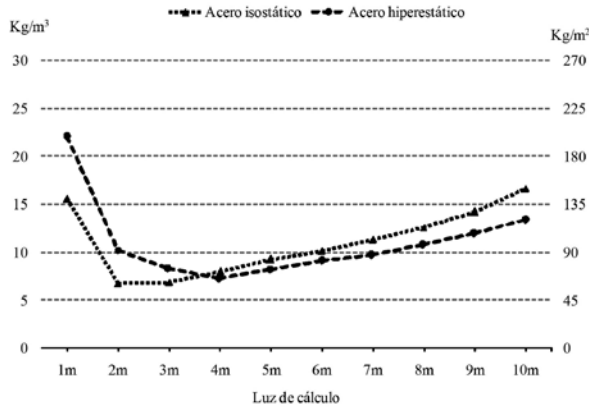


Figura 5. Acero. Comparación por pesos. Fuente: elaboración propia

4.2 ESCENARIO HIPERESTÁTICO

A pesar de que los resultados en peso sitúan la solución de acero como la más ligera, en términos ambientales estas presentan una mayor cantidad de energía embebida en todo el rango de luces del pórtico (Figura 6). Por otro lado, los valores de impacto ambiental de la solución de hormigón armado se mantienen prácticamente constantes a partir de los 4 metros de luz de pórtico, siendo los 6 metros la luz óptima para minimizar los impactos ambientales.

En cambio, para la solución de pórticos de acero a partir de los 4 metros donde ambos valores de impacto ambiental incrementan a medida que incrementa la luz de los pórticos hasta llegar a los 10 metros. Como ya hemos comentado, esto es debido a que este sistema estructural permite optimizar más el uso del material utilizado siendo por el contrario más sensible a los incrementos de carga. La diferencia entre los impactos ambientales de ambas soluciones es del orden de 1 a 3 para pórticos de 4 metros y de 1 a 5 para los pórticos de 10 metros, siendo siempre las soluciones de hormigón armado las de menor impacto.

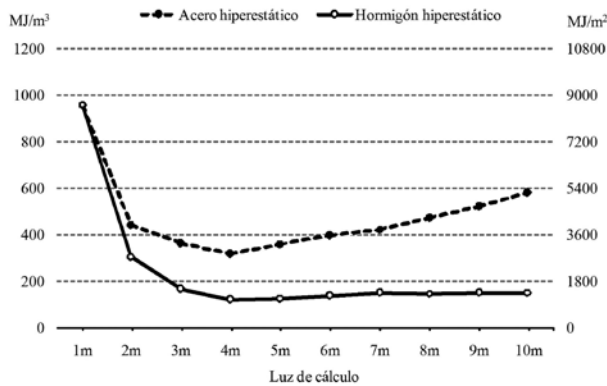


Figura 6. Hiperestático. Energía embebida. Fuente: elaboración propia

4.3 ESCENARIO ISOSTÁTICO

El comportamiento ambiental de los sistemas isostáticos es un tanto parecido a los sistemas hiperestáticos. A pesar de que se observa un mejor comportamiento ambiental del sistema porticado de acero para luces inferiores a 4 metros, los resultados demuestran que los sistemas porticados de hormigón minimizan el impacto ambiental frente a la solución de pórticos de acero para luces lógicas de un sistema estructural (Figura 7).

La principal diferencia respecto al escenario hiperestático entre ambas soluciones es que la relación frente a los impactos ambientales es de 1 a 1,5 para luces de 5 metros y de 1 a 3 para luces de 10 metros, siendo siempre las soluciones de hormigón armado las de menor impacto ambiental.

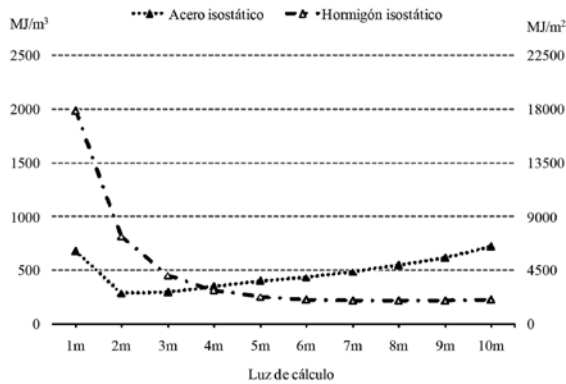


Figura 7. Isostáticos. Energía embebida. Fuente: elaboración propia

5. CONCLUSIONES

Considerando la unidad funcional de un ACV como herramienta básica para poder comparar distintos sistemas de habitabilidad, consideramos necesario incorporar una unidad funcional expresada en ‘m³’ en lugar de ‘m²’. Este cambio de unidad funcional permite obtener ratios comparativos de mayor precisión entre edificaciones volumétricamente distintas.

Si nos fijamos en la relación de impacto unitario entre el hormigón y el acero vemos como esta es del orden de 1 a 65 (de 0,63 MJ/kg del hormigón a los 41,50 MJ/kg del acero) pero cuando observamos esta relación de impactos en el sistema esta llega a ser de 1 a 5 en el peor de los casos. Así pues, no existe relación directa, los impactos ambientales dependen en gran medida de las prestaciones de los materiales y de las necesidades del sistema.

En prácticamente todas las hipótesis y escenarios analizados tanto en acero como en hormigón armado, las soluciones hiperestáticas representan la estrategia estructural más ligera. Las diferencias de peso entre el sistema más ligero de acero hiperestático y el sistema más pesado de hormigón isostático, es del orden 18 veces más para luces de 5 metros y de 6 veces más para luces de 10 metros. Estas diferencias de peso evidencian

una repercusión en el sistema de cimentación y en consecuencia en el impacto ambiental del conjunto del edificio.

La reversibilidad de un sistema y su posterior reutilización o incluso la consideración de valores de impacto de acero reciclado, evidencian la necesidad de ampliar los ACV más allá de la primera utilidad.

6. RECONOCIMIENTOS

Queremos agradecer la implicación y dedicación en el trabajo desarrollado por parte del estudiante Robert Bordonada en su proyecto final de grado en Arquitectura Técnica y Edificación, parte del cual se ha incorporado en el presente estudio.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Eurostat, Energy, transport and environment indicators, in: Euro-stat Pocketbooks, 2010 ed., European Commission, 2010, Accedido el 6 de enero, 2016, desde http://europa.eu/index_en.htm
- [2] Erlandsson, M., Borg, M. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services today practice and development needs. Accedido el 6 de enero, 2016, desde: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132303000313>
- [3] Pagès,A; Paris,O; Cuchi,A; Reducing CO₂. Are the Industrialised construction systems better?. Portugal SB07. *Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium*, Volume 2, 1075-1082. Año: 2007 ISBN: 978-1-58603-785-7
- [4] Asdrubali, F., Baldassarri, C., Fthenakis, V.(2013). Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings*, Volume 64, September 2013, páginas 73–89. Accedido el 6 de enero, 2016, desde: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.018>
- [5] Parlamento Europeo/Consejo de la Unión Europea. (2010, 19 de mayo). Directiva 2010/31/UE relativa a la Eficiencia Energética de los Edificios. Diario Oficial de la Unión Europea. L 153/13.
- [6] Wadel, G.(2009). La sostenibilidad en la construcción industrializada. La construcción modular ligera aplicada a la vivienda. (Tesis Doctoral)
- [7] Gumí, J., Puig, D., El Cost de les Emissions de CO₂ en la construcció dels habitatges i la seva ponderació amb el "coeficient de retorn al acopi". Proyecto final de Grado. EPSEB. (2013) Accedido el 6 de enero, 2016, desde: <http://hdl.handle.net/2099.1/20369>; <http://hdl.handle.net/2099.1/20410>
- [7] Densley, D., Davison, B., Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits of design for deconstruction. *Building and Environment*, volume 57 (2012), Pages 387-395. Accedido el 6 de enero, 2016, desde: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.005>
- [9] BEDEC ITEC. Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya. Accedido el 6 de enero, 2016, desde: <http://itec.cat/nouBedec.c/bedec.aspx>.
- [10] Mercader, M.P., Ramírez De Arellano, A., Olivares, M., (2012). Modelo de cuantificación de las emisiones de CO₂ producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. *Informes de la Construcción*, 64(527):401-414, Accedido el 6 de enero, 2016, desde: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.082>.
- [11] Payá-Zaforteza I., Yepes, V., Hospitaler, A., González-Vidosa, F. (2009). CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*, 31(7):1501-1508, Accedido el 6 de enero, 2016, desde: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct>.