

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES INDUSTRIALIZADOS PARA EDIFICACIÓN VERTICAL A TRAVÉS DE PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD¹

Expositora e investigadora

Lizeth Rodríguez Rodríguez

Departamento de Organización del Espacio

1. Introducción

Evitar los impactos ambientales en el sector de la construcción es uno de los retos planteados en las agendas de gobernanza, esto se refleja en leyes, reglamentos, códigos, normas y manuales. El evento detonante de este fenómeno global ha sido el Protocolo de Kyoto, en el que las naciones se comprometieron a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, a través de estrategias enfocadas a combatir las causas de emisiones. Dos de estas causas que contribuyen al cambio climático están vinculadas a las edificaciones; la primera es la generación de residuos y la segunda es el uso de recursos no renovables y quema de combustibles fósiles (Comunidad Autónoma de Cataluña, 2017). El sector de la construcción representa casi el 40% del consumo mundial de energía, el 30% del uso de materias primas, el 25% de los residuos sólidos, el 25% del uso del agua, el 12% del uso del suelo y el 33% de las emisiones mundiales relacionadas con gases de efecto invernadero (Chau, Leung y Ng, 2015).

La acción más importante que las naciones han realizado es generar instrucciones de obligatorio cumplimiento para la evaluación y desarrollo de proyectos de edificación en todas

sus etapas: planificación, diseño, construcción, rehabilitación y desmontaje (AENOR, 2006). Para este fin, se han creado herramientas y bases de datos que ayudan a los profesionales vinculados al sector de la construcción a generar mejores alternativas de desarrollo y a comprobar los impactos que generan sus decisiones de diseño. Asimismo, la industria tiene el deber de incorporar información sobre las emisiones de sus procesos productivos en la certificación de sus productos (AENOR, 2014) (Rossi, Marique, Glaumann, & Reiter, 2012).

Una estrategia de optimización en el diseño para la reducción de impactos incorporados es la construcción con técnicas de prefabricación industrializada y según el tipo de edificación, así será la reducción de impactos, como lo indica un estudio comparativo entre escuelas construidas con sistemas convencionales y sistemas industrializados, que muestra hasta un 60% de ahorro energético, reducción de residuos y reducción en la huella de carbono (Pons & Wadel, 2011). En la actualidad, los sistemas constructivos industrializados pueden ser de tipo abierto o cerrado, ya sea en la totalidad del edificio o en alguno de sus elementos. En el caso de los sistemas cerrados, cada elemento es coincidente con otro, provistos

¹ El estudio completo puede ser recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/166482>

de compatibilidad entre sí. En contraste a estos, los sistemas abiertos se caracterizan por ser estándar y brindan flexibilidad en el diseño, pero requieren de especial atención a las uniones (Albus, 2017 y Albus, 2018).

Para ampliar esta óptica, el presente trabajo tiene como objetivo obtener los resultados de los impactos ambientales caracterizados en dos tipos de impactos considerados relevantes en la industria de la construcción, dado el flujo de energía a lo largo de la cadena de suministro basado en el principio de la conservación de la energía (G. P. Hammond & Jones, 2008), que para efectos de este análisis será la energía contenida en los materiales de construcción, estos impactos son los siguientes: Energía Contenida y CO2 equivalente, incorporados en la fabricación y transporte de siete versiones de modelos estructurales predimensionados con sistemas de construcción industrializada para un mismo edificio prototipo.

2. Metodología

Se aborda el estudio desde tres puntos de vista: construcción y prefabricación industrializada, desarrollo estructural y parámetros de sostenibilidad. Para construir el hilo conductor entre las tres temáticas se formula la pregunta investigativa: ¿Cuál es el elemento vinculante

entre las temáticas construcción, estructura y sostenibilidad? Para responder a esta pregunta se ha desarrollado un esquema metodológico que detalla las fases de trabajo y se especifican los resultados que fundamentan la fase que precede.

Fase I. Búsqueda de referentes

En la fase de búsqueda de referentes, se establece la relación entre sistemas estructurales según la caracterización de los sistemas constructivos y se ejemplifican a través de casos de estudio. Hay especial interés en los casos de estudio de cuatro plantas, con el propósito de verificar la mínima existencia de elementos estabilizadores estructurales. El factor común en los cuatro casos de estudio fue la regularidad en el diseño y el prescindir de arriostramiento.

Fase II. Desarrollo de edificio prototipo

El edificio “prototipo-X” es la base para el desarrollo estructural en siete combinaciones de sistemas estructurales representativas de las tipologías mencionadas en la Tabla 1 que suscribe un área de 25 m. x 25 m. y que potencialmente puede albergar entre seis y ocho unidades habitacionales (viviendas) por planta con un solo núcleo de escaleras y elevador. Otro criterio de desarrollo es la simetría en planta y la regularidad tanto vertical como horizontal. Ver Figura 1 y Tabla 1.

Figura 1. Planta de edificio “prototipo-X”.

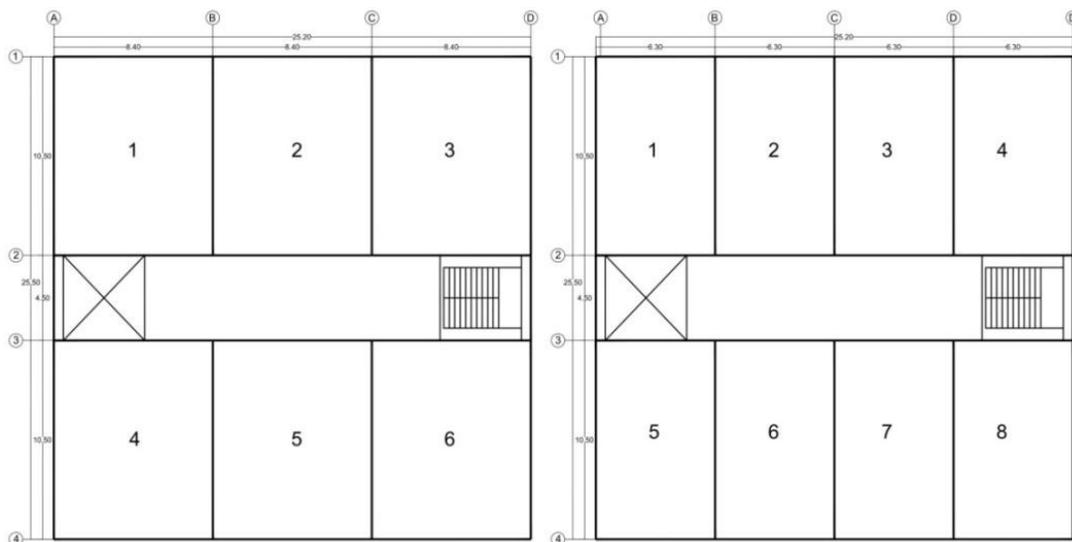


Tabla 1. Elementos del sistema estructural y envolvente

Sistema estructural	Edificio	Elemento resistente vertical	Elemento resistente horizontal	Losa	Fachada no portante
PÓRTICOS	1-P-H	Pilar hormigón prefabricado.	Viga hormigón prefabricada.	Placa alveolar.	Fachada hormigón prefabricada.
	2-P-A	Pilar acero HEB.	Viga acero IPE.	Chapa grecada.	Fachada hormigón prefabricada.
MUROS	3-M-H	Muro hormigón prefabricado.		Placa alveolar.	
	4-M-M	Muro madera CLT.		Panel CLT.	
MIXTO	5-MIX-H	Módulo semi cerrado.		Placa alveolar.	
MÓDULO 3D	6-3D-H	Módulo 3D hormigón prefabricado.			
	7-3D-M	Módulos 3D CLT.			

Tomando en cuenta las condiciones del Documento Básico Seguridad Estructural del Código Técnico de la Edificación (CTE-DB-SE) (Ministerio de Fomento, 2009b), se establecen los coeficientes parciales de seguridad para acciones y materiales, así como los coeficientes de simultaneidad para las acciones. Son generadas las combinaciones de Estados Límite Último ELU y Estado Límite de Servicio ELS para las acciones CTE-DB-SE-AE (Ministerio de Fomento, 2009a).

Fase III. Análisis de parámetros ambientales

Tomando en cuenta la base de datos ICE Inventory of Carbon and Energy (G. Hammond, Jones, Lowrie, & Tse, 2011) se desarrolla el cálculo de impactos ambientales de Energía y CO₂ equivalente, por fabricación y transporte de los siete edificios predimensionados. Asimismo,

se analizan los resultados de forma comparativa y se establecen parámetros conceptuales y medibles para estimar el potencial de evitar impactos. En este caso, no se realiza ACV al cierre del ciclo, pero se estima un análisis de cargas ambientales por la fabricación y transporte bajo una aproximación tipo Cradle to Gate (cuna a puerta) que contabiliza las cargas ambientales desde el origen de materias primas hasta la puerta de la fábrica según dos indicadores ICE.

3. Resultados

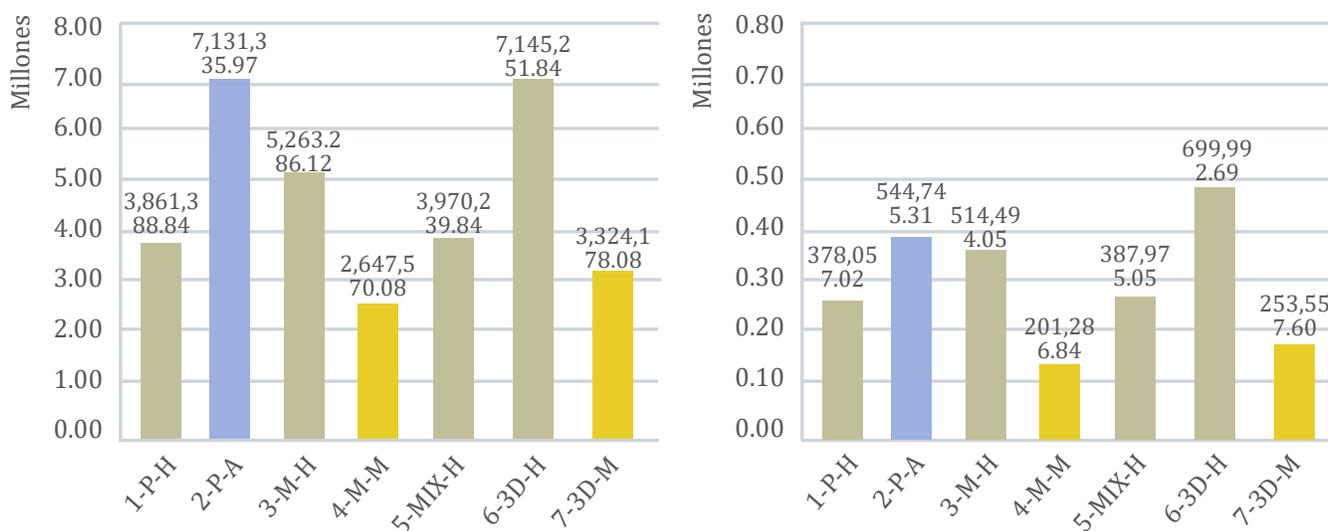
Cálculo de impactos ambientales por fabricación

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de impactos denominados EE (Embodied Energy) y EC (Embodied Carbon) que son la Energía y CO₂ equivalente para cada uno de los elementos. Ver Figura 2.1 y 2.2 y Tabla 2.

Tabla 2. Área y peso de siete edificios

Edificio	SISTEMA	Área edificada (m ²)	Peso edificio (T)	Peso (kg/m ²)
1-P-H	Pórticos de hormigón prefabricado.	2570,40	1726,27	672
2-P-A	Pórticos de acero.	2590,80	1430,24	552
3-M-H	Muros de hormigón prefabricado.	2479,04	2391,89	965
4-M-M	Muros de madera CLT.	2728,20	898,50	329
5-MIX-H	Módulo 3D de hormigón y forjado prefabricado.	2621,44	1810,06	690
6-3D-H	Módulo 3D de hormigón prefabricado.	2548,80	3174,27	1245
7-3D-M	Módulo 3D de madera CLT.	2592,00	1135,54	438

Figura 2.1. Embodied Energy EE (MJ) fabricación. Fig. 2.2 Carbón EC (kg CO₂ equivalente) fabricación.



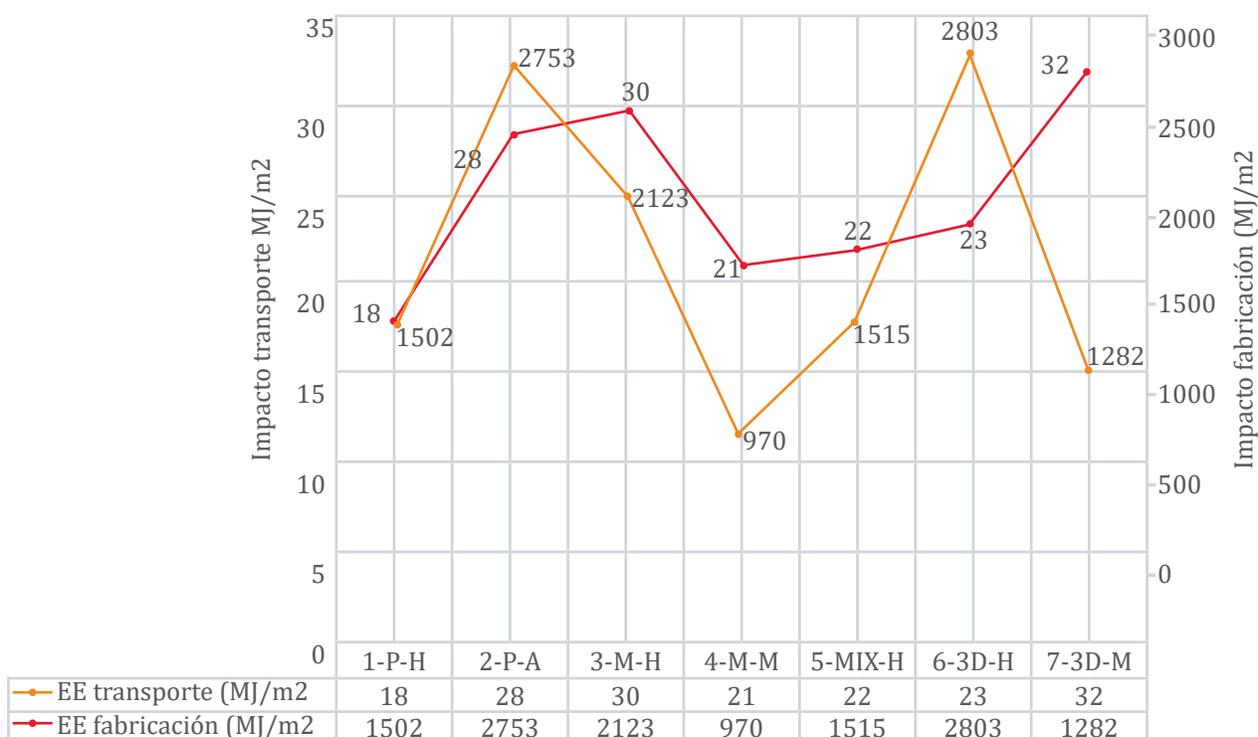
Cálculo de impactos ambientales por transporte

Los impactos por transporte de la fábrica a la obra son estimados para un valor de impacto según el tipo de transporte, en este caso se ha tomado como muestra un vehículo de 14 toneladas para la mezcladora de hormigón in situ y un vehículo de 40 toneladas para los elementos de construcción prefabricada e industrializada. Este dato se toma de tres empresas fabricantes en Cataluña. El valor de impacto ambiental

está dotado según el tipo de transporte; en ese sentido, para el vehículo de 14 toneladas, el impacto es de 0,0022 MJ/kg.km y para el de 40 toneladas es de 0,0008 MJ/kg.km

En la Figura 3 se presentan los impactos por transporte y fabricación, así como la relación comparativa entre ambos, siendo de hasta 121 veces mayor el impacto por fabricación que el de transporte aun para el edificio 6-3D-H, el que más pesa.

Figura 3. Relación entre EE transporte (MJ/m²) y EE fabricación (MJ/m²).



4. Discusión

A continuación, se presentan los resultados del análisis para establecer el potencial de evitar impactos, aplicando los siguientes tres conceptos:

- Reutilización:** proceso para volver a utilizar elementos desechados y darles un uso igual o diferente. Este concepto se aplicará para evitar impactos, como la capacidad de los

elementos de construcción industrializada para mantener su función estructural en caso de ser desmontados y tener que ser ensamblados nuevamente para una segunda vida útil (Asam, 2007). La valoración de impactos evitados en el análisis se pondera a través de cinco porcentajes: 10%, 25%, 50%, 75% y 90%, siendo 10% un bajo potencial de reutilización que es aplicado al hormigón in situ, mientras que el 90% es aplicado a aquellos elementos con un alto potencial de

reutilización, es decir, a los que se estima que no pierden su capacidad resistente debido al tipo de unión generalmente articulado usual en las estructuras de prefabricación industrializada.

- b. Durabilidad:** es una cualidad de la calidad de un material, se refiere al tiempo que permanece cumpliendo sus funciones sin perder sus atributos para lo que ha sido diseñado. Para que la durabilidad se mantenga en el tiempo en las estructuras, el Código Técnico de la Edificación CTE recomienda que el mantenimiento sea dado al menos cada 10 años. En este sentido, se ha optado por hacer una valoración de 0 a 10 años, siendo correlativo con el porcentaje de 0% a 100%.
- c. Funcionabilidad:** utilidad práctica de un elemento. En un edificio, la funcionabilidad puede ser sinónimo de área útil destinada a la función para la que ha sido creada, es decir, los espacios servidos, aunque con cierta reserva, pueden ser clasificados como espacios funcionales en las áreas destinadas a circulación y accesos, quedando fuera de esta clasificación el área de estructuras.

5. Conclusiones

Con respecto a la fase de investigación:

1. La construcción industrializada ha venido evolucionando desde hace casi un siglo, sin embargo, aún no es asequible a todos los sectores ni en todos los países, pero son destacables los esfuerzos de las promociones de vivienda que potencian la construcción industrializada como estrategia de optimización de recursos y desarrollo e innovación tecnológica.

Con respecto a la fase de desarrollo:

2. El anteproyecto estructural y predimensionado ante carga gravitatoria es una muestra representativa para una evaluación y toma de decisión en las etapas tempranas de un proyecto, pero para la

etapa decisiva es requerido todo el escenario demandante de la estructura, lo que lleva al equipo de diseño a considerar sistemas híbridos entre fabricación industrializada abierta y cerrada, o entre sistemas prefabricados y sistemas in situ.

Con respecto a la fase de análisis:

3. La relación de los factores ICE que valoran el impacto ambiental de un material en una determinada etapa del ciclo de vida no son representativos del impacto de un edificio y no es indicador de superioridad en impactos hasta que se realiza la evaluación, según las características del edificio, por ejemplo: el factor ICE del acero laminado es de 21,5 MJ/kg contra el de hormigón prefabricado RC 40-50 MPa, que es de 2,33 MJ/kg, siendo el del acero nueve veces mayor que el de hormigón. Sin embargo, en la relación entre impactos ambientales de los edificios hay una relación de dos a uno del acero respecto al hormigón en MJ/m². Asimismo, la relación entre factores ICE de madera CLT es igual a 3,63 MJ/kg, y el hormigón prefabricado es de 1,5 veces menor al de la madera en MJ/m². Sin embargo, la relación entre impactos de los edificios de hormigón es dos veces mayor al hormigón que la madera.
4. En la relación de impactos por fabricación y transporte, la fabricación supera hasta 75 veces más en promedio al transporte, evaluando distancias de hasta 1,000 kms, con edificios que pesan hasta 3,000 toneladas.
5. El transporte está ligado a la distancia como al peso de los elementos transportados, por tanto, al optar por tecnología pesada debe hacerse a corta distancia, en este caso se han considerado 200 km. Por otra parte, la relación bajo peso, bajo impacto en transporte, es evidente para el caso de los edificios de madera, sobre todo en el caso de los muros, ya que en el caso de los módulos 3D de madera, el volumen es sinónimo de impacto mayor al peso, pues al transportar la unidad 3D es más aire que masa de material lo que se transporta.

Referencias bibliográficas

AENOR, A. E. de N. y C. (2006). *Norma UNE-EN 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006) UNE-EN 14040:2006.*

AENOR, A. E. de N. y C. (2014). *Norma UNE-EN 15804:2012+A1. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción. Norma Española versión de Norma Europea UNE-EN 15804:2012.*

Albus, J. (2017). Prefabrication Concepts in Residential Construction: The Benefits of Modular and Unitized Construction Methods Based on Lightweight and Solid Material Utilization. *Annual International Conference on Architecture*, 393.

Albus, J. (2018). *Prefabricated housing : construction and design manual.* Berlín: DOM publishers,.

Asam, C. (2007). Recycling prefabricated concrete components—a contribution to sustainable construction. *Institute for Preservation and Modernisation of Buildings, Technical University of Berlin, Berlin, Germany, IEMB Info*, 3, 2007.

Chau, C. K., Leung, T. M., & Ng, W. Y. (2015). A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. *Applied Energy*, 143 (1), pp. 395-413. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>

Comunidad Autónoma de Cataluña. (2017). *Ley 16/2017 del Cambio Climático. DOGC No 7426, BOE No234 Legislación Consolidada referencia BOE A-2017-11001.*

Hammond, G., Jones, C., Lowrie, E. F., & Tse, P. (2011). Embodied carbon. *The Inventory of Carbon and Energy (ICE)*. Version (2.0).

Hammond, G. P., & Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 161 (2), pp. 87-98. Recuperado de <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>

Ministerio de Fomento, G. de E. (2009a). *CTE-DB-SE-AE*. [7]. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación.

Ministerio de Fomento, G. de E. (2009b). *CTE-DB-SE*. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural.

Pons, O., & Wadel, G. (2011). Environmental impacts of prefabricated school buildings in Catalonia. *Habitat International*, 35 (4), pp. 553-563. Recuperado de <https://doi.org/2011.03.005>

Rossi, B., Marique, A. F., Glaumann, M., & Reiter, S. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Building and Environment*, 51, pp. 395-401. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.017>