

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y PREFABRICACIÓN. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL DE DIFERENTES SISTEMAS INDUSTRIALIZADOS EN LA EDIFICACIÓN

**¹Lizana Moral, F.J.; ¹Serrano Jiménez, A.J.; ¹Vilches Such, A.; ¹Barrios Padura, A.;
²Molina Huelva, M.;**

¹Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Departamento de Construcciones Arquitectónicas I. Universidad de Sevilla

**²Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla
Avda. Reina Mercedes nº2, 41012, Sevilla**

**e-mail: lizanafj@gmail.com, antserjim@gmail.com, avilchessuch@gmail.com,
abarrios@us.es, martamolina@us.es**

RESUMEN

El sector de la construcción se ha mantenido estancado en la producción artesanal tanto en la fabricación de productos y elementos constructivos, como en la puesta en obra, precisando de un correcto engranaje entre los distintos sistemas para conseguir una correcta ejecución, mejoras en el confort y la habitabilidad, y reducciones de precio y huella ecológica.

Frente a esto, la prefabricación y los sistemas industrializados contribuyen a un modo de construcción que supone la reducción de la cantidad de recursos empleados, el aumento de la vida útil debido a mejores controles de calidad, la reducción de la cantidad de residuos y la minoración de los costes indirectos de obras debido a la rapidez de su ejecución.

Sin embargo, para poder cerrar el ciclo de los materiales es necesario que el sistema de prefabricación permita la reutilización de los componentes. Para ello, el diseño, la coordinación dimensional, la definición constructiva exhaustiva de los elementos y las uniones en su ejecución deben alcanzar la dedicación previa y el protagonismo necesario para evitar incoherencias y errores continuos que provoquen procesos de ida y vuelta.

Una completa construcción en seco permite el montaje y desmontaje de elementos reutilizables y para ello, el control previo de la fase de obra debe estar estudiado y ajustado al detalle. Además, resulta necesario rediseñar los elementos prefabricados de manera que su reciclaje sea sencillo y que la separación de los grupos de materiales no se dificulte al final de su vida útil.

Ante esto, la experiencia en diversos sistemas de prefabricación con profesionales y empresas del sector, en el desarrollo y definición constructiva de elementos, permite fijar un marco de requerimientos, necesidad y limitaciones a tener en cuenta en todo proyecto.

En la presente comunicación se mostrarán las premisas y estrategias de diseño en la construcción prefabricada desarrolladas mediante la consideración de la gestión integral del ciclo de vida en la edificación. Se determinará que sistemas y procesos de prefabricación e industrialización poseen mayor grado de beneficio ambiental. Esto permitirá establecer los puntos de partida claves que permitan a técnicos el uso eficiente y sostenible de dichos sistemas.

Keywords: Ciclo de vida, Prefabricación, Reutilización, Diseño, Sostenibilidad.

1.- Introducción

El uso de sistemas constructivos prefabricados en la arquitectura ha evolucionado desde principios del siglo XX para adaptarse a las necesidades de cada época. Recientemente, el informe redactado por la comisión europea para la consecución de los objetivos del Horizonte 2020 [1] reconoce a los sistemas prefabricados los beneficios de una reducción de coste respecto a la construcción convencional, promoviendo su uso.

Durante los últimos años, las inversiones en modernización y en I+D+i han permitido un gran perfeccionamiento de los sistemas constructivos prefabricados, desarrollando soluciones constructivas más fiables, completas y eficaces que han permitido la industrialización de la construcción con altos niveles de calidad [2].

Existe una tendencia generalizada que reconoce la prefabricación e industrialización como técnicas constructivas sostenibles y eficientes, sin embargo, en pocas ocasiones existe una evaluación y cuantificación rigurosa, mediante herramientas de valoración medioambiental, que demuestren aquellas atribuciones que se les presuponen: un mejor aprovechamiento del material, una menor generación de residuos, una reducción del consumo energético o incluso la posibilidad de reutilizar recursos a lo largo de su vida útil.

En este sentido, el “Análisis de Ciclo de Vida” (ACV) nos ayuda en la identificación y evaluación de aquellos factores favorables y desfavorables que influyen en todo el proceso de edificación, y contribuye en el desarrollo de estrategias orientadas a disminuir el impacto ambiental de la construcción industrializada.

En la presente comunicación se combina mediante un análisis cualitativo y reflexivo, los diferentes sistemas de prefabricación e industrialización considerando cada una de las etapas que influyen en el análisis de su ciclo de vida. Se pretende obtener una evaluación de las ventajas y desventajas que supone la inversión en los diferentes sistemas de construcción prefabricada en relación a la construcción convencional.

Poseer una visión conjunta de la prefabricación y el análisis ciclo de vida abrirá las puertas a una renovada industrialización, pues permitirá comprender la afección de cada uno de los procesos vinculados a cada sistema.

2.- Definición de los diferentes sistemas prefabricados industrializados

Previo a evaluar los diferentes tipos de sistemas constructivos prefabricados e industrializados en los que se centrará el estudio, se definen los principales términos y clasificaciones que se emplearán en el proceso de evaluación y valoración.

La prefabricación, que etimológicamente significa fabricar antes, es un método industrial de construcción en el que los elementos son fabricados por mecanismos de producción en taller, montados posteriormente en las obras mediante aparatos y dispositivos elevadores. Por otra parte, se define la industrialización como el proceso de reproducción de estos elementos prefabricados considerando su distribución y comercialización en grandes series.

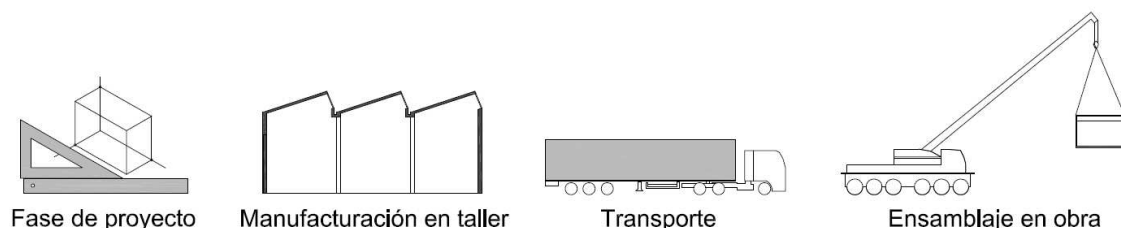


Fig. 1 “Fases conceptuales de la prefabricación”. Fuente: Elaboración propia.

La prefabricación de un sistema constructivo se basa en el diseño y la producción de componentes de forma integral o parcial, con subsistemas elaborados en serie en fábrica, fuera de su ubicación final. Bajo este mismo concepto de prefabricación se define una clasificación interna dividida en dos grados oscilantes [3]:

- Una prefabricación parcial, en la que se estudian, diseñan y fabrican las piezas que van a conformar el edificio en sí. Se basa en una industrialización manejada por el “Método de Elementos” (Industrialización abierta o por componentes).
- Una prefabricación integral, que supone la creación en fábrica del edificio en su totalidad, siendo únicamente necesario el transporte hacia el lugar definitivo. Esta variante está asociada a una industrialización manejada por “Método de Modelos”, con sistemas completados y cerrados en taller.



Fig. 2 “Grados de prefabricación”. Fuente: Águila, 2006 [3].

Surge en la prefabricación otra clasificación interna de los sistemas prefabricados en ligeros o pesados, referente a la a densidad de sus elementos, que a su vez influye en la puesta en obra, la reducción de los tiempos de ejecución o la necesidad de disponer de maquinaria pesada, aspectos que aumentan el coste final del producto. Una de las aportaciones fundamentales de la prefabricación, está referida a la coordinación dimensional y modular de las piezas (UNE 41604:1997 [4]):

- La coordinación dimensional se define como un sistema racional para fijar y relacionar las dimensiones y las disposiciones de los elementos que intervienen en la construcción, actuando como determinante para la unión entre los mismos.
- La coordinación modular, a la hora del establecimiento de un módulo tipo a desarrollar, se consigue a partir de la coordinación dimensional. Pretende eliminar la fabricación, modificación o adaptación de piezas en obra reemplazando el proceso artesanal por el industrial.

La prefabricación permite desarrollar un amplio control de calidad del proceso constructivo. La industrialización atribuida a la prefabricación de un edificio, tiene previamente una etapa de estudio y análisis de los componentes en un proceso de continua ida y vuelta entre diseño y ejecución. Seriar un modelo lleva a estudiar mejor cada una de sus piezas, por tanto, es una ventaja que la prefabricación consigue frente a la creación in situ de la arquitectura tradicional.

Por último, otro factor que afecta directamente al proceso de industrialización es la fase de transporte y puesta en obra, donde los sistemas prefabricados e industrializados pueden llegar a ser competitivos, orientados a alcanzar la menor generación de residuos posible, y la mayor optimización de recursos y costes.

- Una prefabricación parcial supone un transporte del conjunto de las piezas en dos dimensiones (2D), de modo que el transporte es más ajustado y económico pero cuenta con un mayor riesgo de ineficacia en el ensamblado en el lugar de implantación.
- La prefabricación integral supone un transporte en tres dimensiones (3D) y consigo mayores exigencias y limitaciones a la hora de ser transportado al influir dimensiones, peso y acciones en el modo de transporte. Sin embargo, la ejecución del edificio una vez transportado es simplemente la de emplazarlo y nivelarlo.

3.- Objeto, alcance y metodología de evaluación

La presente comunicación acomete el desarrollo de un análisis de las tendencias ambientales existentes entre diferentes sistemas prefabricados de construcción, a través de la gestión integral del ciclo de vida en la edificación. Este procedimiento permite fijar los límites de evaluación para su cuantificación y determinar la relación que existe entre sistemas convencionales de construcción y sistemas prefabricados e industrializados, evaluando las tendencias en la disminución del consumo de recursos durante la construcción, la generación de residuos, la recuperación de material al final de su vida útil, etc.

La metodología planteada se basa en la técnica de análisis del ciclo de vida (ACV) establecida en las normas ISO 14040/44:2006 [5], [6], la cual cuantifica el impacto potencial en el medio ambiente de un producto o servicio determinando su consumo de recursos y los impactos asociados.

Esta comunicación asigna los diferentes materiales y procesos utilizados a cada etapa del ACV, que son tomadas de la norma EN 15804:2012 [7]. Desde la aprobación de esta norma todos los sistemas nacionales e internacionales de la Unión Europea sobre Declaraciones Ambientales de Productos (DAP, ISO 14025:2006 [8]) están trabajando en adaptar sus sistemas de certificación. Sin embargo, la interpretación de dicha norma para sistemas complejos de prefabricación varía considerablemente entre diferentes estudios. Con este trabajo se pretende contribuir a eliminar la incertidumbre por la dispersión de criterios establecidos para los diferentes sistemas.

Para ello, se evaluará la tendencia en el desempeño medioambiental de los diferentes sistemas, tomando como referencia la construcción convencional.

3.1.- Sistema de referencia. Construcción convencional

Según las investigaciones consultadas, en los edificios residenciales la energía operacional del edificio representa entre el 80-85% de la energía total del mismo [9]. No obstante, se destaca que la tendencia global promueve realizar edificios con un bajo consumo energético durante su fase de uso. Como consecuencia de este cambio de tendencia la relación anteriormente descrita está evolucionando al 40% de impacto asociado a los materiales del edificio y el 60% perteneciente a la fase de uso del edificio [10].

Para edificios no residenciales, el consumo de energía respecto al total varía en función de las plantas del edificio. Según una investigación sobre un edificio de 6 plantas y 7300 m², localizado en el campus de la Universidad de Michigan (Estados Unidos) el 83% de la energía primaria total se debe a la fase de uso del edificio [11]. El edificio está localizado en, Ann Arbor, Michigan, y el ACV se realizó de acuerdo con las normas ISO y para una vida útil estimada de 75 años. Por otro lado, en el estudio de un edificio de oficinas convencional en la ciudad de Bangkok, Tailandia [12], compuesto de 38 plantas y con estimación de una vida útil de 50 años, la fase de uso supone un 52% de la energía primaria total. Estos ejemplos muestran la diferencia existente en otras tipologías de edificios, influyendo factores como el clima, el uso, etc.

Además, si evaluamos pormenorizadamente, según la revisión de artículos realizada por Cabeza et al. [9], el transporte, el proceso de construcción y demolición llega a responder solo al 1% del total de la energía demandada.

3.2.- Límites del sistema de evaluación para la construcción prefabricada

Los límites del sistema para la fase de prefabricación son escasos y los estudios difieren entre los límites empleados. Tomando como referencia las asignaciones

fijadas por la norma [7], [13], se especifican aquellos límites más difusos para los sistema de prefabricación (tabla 1 y figura 3):

- En la Etapa de producto (A1-3) se incorporan los procesos de extracción, transporte, fabricación y prefabricación de aquellos elementos prefabricados que se procesan de manera previa al transporte a obra.

Etapa de producto A1-3			Construcción A4-5		Etapa de uso B1-7						Etapa de fin de vida C1-4				D	
Suministro de materias primas	Transporte	Fabricación	Transporte	Proceso de construcción. Instalación.	Uso	Mantenimiento	Reparación	Sustitución	Rehabilitación	Uso de energía en servicio	Uso de agua en servicio	Deconstrucción	Transporte	Tratamiento de residuos	Vertido de residuos	Beneficios y cargas más allá del límite del sistema

Tabla 1 “Diferentes etapas a evaluar en el desempeño ambiental de diferentes sistemas de construcción”. Fuente: EN 15804:2012 [7]

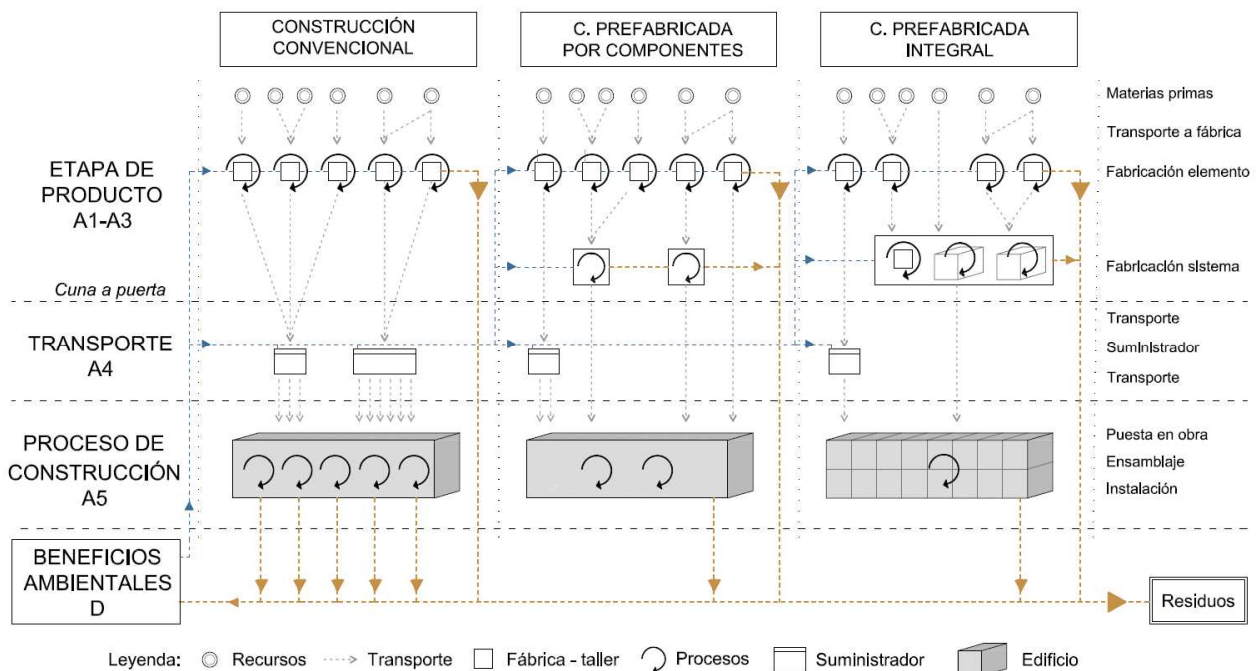


Fig. 3 “Comparación etapas A1-A5 y D de diferentes sistemas de prefabricación industrializada con la construcción convencional”. Fuente: elaboración propia

- En la etapa del proceso de transporte (A4) se incluyen los procesos de acopio de materiales en un suministrador intermedio. Se entiende parte del transporte, al no tener un procesado del material sino ser parte de la cadena de distribución [14].
- En la etapa de construcción (A5) se atribuyen todos aquellos procesos que ocurren en el solar donde el edificio tendrá lugar.
- La etapa de uso (B) ha de incluir los requisitos necesarios para un funcionamiento equivalente del edificio. Para definir dicha equivalencia es necesario tener en cuenta: exigencias básicas de habitabilidad (confort térmico, acústico,...), resistencia al fuego y mantenimiento de los elementos.
- La etapa fin de vida (C) se inicia cuando se sustituye, se desmonta o es deconstruido el edificio y no presenta ninguna funcionalidad adicional.

- La etapa D hace referencia a los beneficios que el sistema permitirá desarrollar fuera de su ciclo de vida: viabilidad de reutilización como material, combustible, etc.

4.- Resultados

Se desglosa de manera secuencial las etapas A1-A3, A4, A5, B1-2, B3-5, B6, C y D de cada sistema de construcción según la EN 15804:2014 [7] con la finalidad de vincular correctamente cada uno de los procesos unitarios que se desarrollan. Asumiendo que pueden existir particularidades en cada sistema en cuanto al tipo de material soporte utilizado (hormigón, madera o acero), la evaluación de cada uno de los procesos que intervienen entre los distintos sistemas de construcción nos permite justificar las siguientes afirmaciones:

4.1.- Etapa de producto. A1-A3

La energía incorporada de los sistemas prefabricados respecto a la construcción convencional varía principalmente debido a la consideración de sistemas pesados o ligeros. Esta consideración lleva implícito el tipo de material utilizado.

Los sistemas pesados son derivados del uso de grandes cantidades de recursos materiales con impactos ambientales unitarios bajos (ejemplo: cerámica, cemento y áridos). El alto volumen material que se consume repercute en un impacto global considerable [15]. Pese a ello, estudios demuestran como la optimización en el diseño de elementos estructurales prefabricados pesados tienen un mejor comportamiento ambiental frente a sistemas convencionales [16].

Por otro lado, los sistemas ligeros, a pesar de su baja densidad, están formados por materiales energéticamente intensivos en su mayoría (ejemplo: acero, aluminio, polímeros sintéticos,...). Esto hace que la energía incorporada de los sistemas sea en muchos casos mayor a la construcción convencional.

Sistemas de construcción prefabricada:	Etapa de producto (A1-3)	Proceso de construcción		Relación respecto al sistema referencia
		Transporte (A-4)	Puesta en obra (A-5)	
Integral pesada	=	+	+++	
Integral ligera	-	+	+++	
Por componentes pesados	=	++	+	
Por componentes ligeros	-	++	+	

(=): desempeño ambiental equivalente | (+): beneficios en el desempeño ambiental | (-): detrimento del desempeño ambiental

Tabla 2 "Evaluación de las tendencias en el desempeño medioambiental referente a la energía incorporada de diferentes sistemas". Fuente: elaboración propia

Los recursos utilizados varían según el tipo de prefabricación (integral o por componentes) y el peso del edificio. Hay que tener en cuenta que los sistemas de edificación pesada requieren mayores cantidades de sección material para cimentación y estructura, debido a la gran capacidad portante que demandan.

Frente a esto, los sistemas ligeros pueden llegar a alcanzar ratios inferiores al 20% del peso de la construcción convencional y pesada, lo que deriva en menores secciones materiales asociadas a estructura y cimentación.

Sistemas de construcción:	Etapa de producto		Proceso de construcción	
	(A1-3)	Transporte (A-4)	Puesta en obra (A-5)	
Construcción convencional	kg/m ² del material que ingresa en obra			Sistema referencia
C.P. integral pesada	Recursos consumidos	-		Relación respecto al sistema referencia
C.P. integral ligera		+ +		
C.P. por componentes pesados		=		
C.P. por componentes ligeros		+ + +		

(=): *desempeño ambiental equivalente* | (+): *beneficios en el desempeño ambiental* | (-): *detrimiento del desempeño ambiental*

Tabla 3 “Evaluación de las tendencias en el desempeño medioambiental referente a los recursos consumidos de diferentes sistemas”. Fuente: elaboración propia

El sistema de prefabricación por componentes, a diferencia de los sistemas integrales, no requieren de una gran cadena de producción que abastezca la construcción, sino que por el contrario numerosas partidas suelen ser realizadas a proveedores locales situados cercanos al edificio. Esto da lugar a un mayor consumo de recursos locales o regionales en beneficio de economías más distribuidas y reduciendo los impactos ambientales que resultan del transporte.

Además, para realizar un análisis más exhaustivo, es necesario añadir a las variables medioambientales, la viabilidad económica de cada sistema.

La prefabricación integral frente a la prefabricación por componentes lleva asociado altos costes de fabricación derivados de la escala de producción, es decir, demanda grandes infraestructuras que permitan el desarrollo del edificio completo tridimensional y su almacenaje en taller antes de su ensamblaje en obra. Esto dificulta el desplazamiento de las cadenas de producción.

Además, esta necesidad dificulta en muchos casos el desarrollo de estos sistemas sin la presencia de altas demandas de edificación. Frente a esto, hoy día están apareciendo algunos prototipos industrializados de prefabricación abierta integral, donde se permite un diseño abierto bajo las posibilidades del sistema (Ej.: Sistema World Metor: producción industrializada de módulos compactos de 6 caras de hormigón armado). Aun así, sigue persistiendo un radio de actuación límite en torno al origen de producción por inviabilidad económica del transporte.

4.2.- Transporte a obra. A4

Las limitaciones del transporte, tanto dimensiones, funcionales, como económicas, son de gran importancia en el desarrollo de sistemas de prefabricación. La coordinación dimensional y modular de los sistemas prefabricados e industrializados permite una mayor eficacia en el desplazamiento de los recursos.

La única dificultad intrínseca es que a medida que aumenta el grado de terminación de la edificación en fábrica, mayores dificultades se presentan. Por ello, es menester conocer las limitaciones dimensionales y económicas existentes, en comparación con las necesidades funcionales del edificio, para determinar la viabilidad de un sistema de prefabricación u otro.

En el ámbito nacional, según la DGT (Dirección General de Tráfico), las dimensiones permitidas para transporte son:

	Ancho máximo	Altura máxima	Longitud máxima
Vehículos rígidos	2,55-2,60m	4-4,5m	12m
Vehículos articulados	2,55-2,60m	4-4,5m	12+2,04=14,04m
Transporte especial (Genérico, Específico y Excepcional)	>2,55-2,60m	>4-4,5m	>14,04m

Tabla 4 “Limitaciones dimensionales en el transporte de mercancías”. Fuente: Dirección General de Tráfico, España.

En cuanto al grado de eficiencia en el transporte, la prefabricación por componentes permite optimizar aún más la etapa de transporte, frente a la integral, donde la mayor parte del volumen transportado acaba siendo aire.

4.3.- Puesta en obra. A5

Los procesos de obra, entendidos como aquellas actuaciones de construcción que demandan consumo de electricidad y combustibles, alcanzan mayor eficiencia conforme alcanzan un mayor grado de prefabricación e industrialización. Comparando entre los diferentes sistemas de construcción para un mismo grupo material (fig. 3), el beneficio en la prefabricación se encuentra principalmente en la reducción de costes directos e indirectos asociados a cortos periodos de construcción, transportes de equipos y trabajadores, y a que la pre-construcción en taller permite desarrollar un alto grado de control de calidad. La mayor parte de los procesos de construcción deben de ocurrir (antes o durante la obra), pero la coordinación dimensional y modular, así como la prefabricación e industrialización permiten que en tiempo se reduzca debido a una mayor eficiencia.

Todo lo contrario ocurre cuando en vez de realizar la comparación entre diferentes sistemas bajo un mismo grupo material, se evalúa entre los procesos asociados a distintos materiales. Estas diferencias se observan en la investigación desarrollada por Cole [17] en Vancouver, 1998. Cole realizó un estudio sobre una muestra de 39 edificios, para la cuantificación de los indicadores tuvo en cuenta el transporte asociado a los trabajadores, el transporte del material y los procesos necesarios para la colocación en obra de dichos materiales. De esta investigación extrajo que la construcción de estructuras de acero suponían la menor media en energía incorporada, obteniendo valores entre 3 y 7 MJ/m², para edificios de estructura de madera obtuvo entre 8 y 20 MJ/m², mientras que para edificios de hormigón in-situ fueron entre 20 y 120 MJ/m² (fig. 4). Además, aunque no aparece en la figura anterior, para edificios de estructuras de hormigón prefabricado obtuvo valores entre 20 y 35 MJ/m².

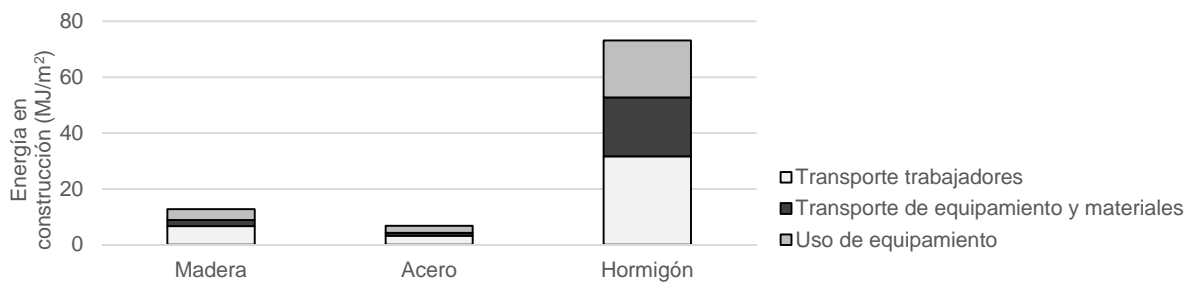


Fig. 4 "Comparación del consumo de energía en los procesos de construcción convencional de diferentes grupos materiales". Fuente: Cole, 1999 [17].

Los residuos sólidos generados durante todo el proceso de fabricación son atribuibles a: residuos generados en procesos de extracción de materias primas y procesos de fabricación; residuos de embalaje derivados del transporte; y residuos de obra procedentes de excedentes de material [18] y falta de coordinación dimensional.

Sistemas de construcción prefabricada:		Proceso de construcción			Relación respecto al sistema referencia
		Etapa de producto (A1-3)	Transporte (A-4)	Puesta en obra (A-5)	
Integral pesada	Residuos sólidos			+++ 90-100%	
Integral ligera				+++ 90-100%	
Por componentes pesados				++ 75-100%	
Por componentes ligeros				++ 75-100%	

(=): *desempeño ambiental equivalente* | (+): *beneficios en el desempeño ambiental* | (-): *detrimento del desempeño ambiental*

Tabla 5 “Evaluación de las tendencias en el desempeño medioambiental referente a los residuos sólidos generados de diferentes sistemas”. Fuente: elaboración propia

El establecimiento de sistemas de prefabricación integral o por componentes apenas influye en los residuos ocasionados en fases anteriores al proceso de construcción. Su aportación principal se debe gracias a la coordinación dimensional y modular de elementos [4], que evita entre el 75 al 100% de residuos de obra [19], [20]. Además, el trabajo en taller permite la fácil revalorización y reutilización de elementos, lo que permite llegar hasta un 2% de residuos en relación a los recursos consumidos [18]. Para un correcto eco-diseño, hay que conocer el funcionamiento de los sistemas de producción. Conocer las dimensiones estandarizadas de fabricación de piezas y sistemas (ejemplo: longitudes estándares de perfiles de acero, paneles, sistemas de fachada,...) nos permite desde el diseño del proyecto tomar decisiones en cuanto a la coordinación modular fijada.

En cuanto a los sistemas unión, la construcción convencional está muy ligada a la unión química de materiales y sistemas (conglomerantes, polímeros,...). Sin embargo, los sistemas de construcción ligera permiten una construcción en seco de la mayoría de los distintos sistemas que componen la edificación, lo que facilita la sustitución, revalorización y recuperación selectiva de materiales y productos. Esto no supone un beneficio intrínseco en la etapa de producto y construcción (A1-A5), pero viabiliza el desarrollo de beneficios ambientales (fig. 3, etapa D). En esta línea, cada día son más presentes sistemas de construcción en seco herencia de los sistemas de construcción en madera de origen anglosajón “Balloon Frame” y “Platform Frame”. Esto ha evolucionado en sistemas de construcción ligera mediante el uso de chapa fina perfilada de acero galvanizado “Light Steel Framing”, en mayor o menor grado de prefabricación e industrialización (Ej.: Sistema Teccon).

4.4.- Etapa de uso. B1-7

La metodología de ACV requiere de una unidad funcional equivalente para poder comparar dos productos, en este caso edificios [8]. Esta unidad funcional debe incluir unas mismas prestaciones técnicas y funcionales del edificio, por lo que se hace necesario resaltar algunas características que condicionan los sistemas de prefabricación. Para ello es necesario ir más allá de los materiales iniciales que se asignan para la construcción de la estructura e identificar la influencia que los sistemas de prefabricación tienen en las necesidades de otros materiales, como aislamientos térmicos, acústicos, protecciones frente al fuego y aquellos necesarios para su mantenimiento que lógicamente suponen un incremento en los impactos ambientales para hacer el edificio habitable en condiciones de seguridad y confort. En la tabla 6 se relacionan los módulos de la etapa B con los diferentes sistemas de prefabricación.

Sistemas de construcción prefabricada:		Etapa de uso (B)			
		Uso y mantenimiento (B1-2)	Reparación y sustitución (B 3-4)	Rehabilitación (B5)	Uso de energía (B6)
Integral pesada	Indicadores asociados	=	=	-	Depende del clima Relación respecto al sistema referencia
Integral ligera		-	+	-	
Por componentes pesados		=	++	++	
Por componentes ligeros		-	++	++	

(=): desempeño ambiental equivalente | (+): beneficios en el desempeño ambiental | (-): detrimento del desempeño ambiental

Tabla 6 “Evaluación de los sistemas de prefabricación en la Etapa B - Uso”.

Fuente: elaboración propia

4.4.1- Uso y mantenimiento. B1-2

Los diferentes sistemas de prefabricación repercuten de forma diferente en las prestaciones de los edificios. Es por ello que dependiendo del sistema elegido se complejiza la justificación de las diferentes exigencias normativas.

Frente a la imposibilidad de justificación de los sistemas utilizados bajo criterios normativos de referencia, la única opción posible acaba resultando de mano de ensayos in-situ o de laboratorio que certifiquen y avalen el cumplimiento de los límites establecidos en la normativa vinculante.

En esta línea, encontramos las dificultades de la prefabricación ligera en el cumplimiento de las exigencias relativas al comportamiento acústico. Un mal uso de dichas soluciones puede derivar en números francos de transmisión indirecta, o bajas prestaciones a ruido aéreo y de impacto. La justificación de dichos sistemas en el ámbito español deriva en altos costes económicos para desarrollo de ensayos y certificaciones que avalen las soluciones. Hay que recurrir a institutos tecnológicos internacionales para poder encontrar soluciones testadas en este ámbito [21].

También existen dificultades de justificación en el comportamiento frente al fuego de sistemas ligeros metálicos o similares. Esto implica lo anteriormente mencionado, o el uso de materiales de revestimiento testados que aporten las prestaciones requeridas, con un incremento de costes asociados a la etapa (A1-3).

4.4.2- Reparación, sustitución y rehabilitación. B3-5

En las etapas de mantenimiento, reparación y sustitución (B3-5) los sistemas prefabricados por componentes aportan la flexibilidad necesaria para poder retirar elementos existentes en el edificio añadiéndolos una vez reparados o bien cambiándolos por otros nuevos en buen estado.

La rehabilitación de sistemas integrales supone una limitación en adaptar el edificio existente a nuevos requerimientos espaciales debido a la rigidez de este sistema. Si bien es complicado incluir este escenario en un cálculo de análisis de ciclo de vida, es necesario resaltarlo pues influye en la durabilidad del edificio, lo que influye en el impacto ambiental global producido.

4.4.3- Uso de energía. B6

El comportamiento energético del edificio en su fase de uso está condicionado por la masa de los materiales que conforman el edificio. Un estudio realizado por Lu Aye et al. [19] compara el comportamiento energético en la fase de uso de un edificio convencional realizado con hormigón, otro realizado mediante prefabricación de acero y una última construcción mediante prefabricación de madera en Melbourne, Australia. El edificio se modelizó en TRNSYS y la envolvente contenía en todos los casos aislamiento de 90mm de celulosa en cerramientos y 100mm de celulosa en forjados en contacto con el exterior. Los resultados muestra que debido a la inercia térmica del hormigón el consumo anual de energía para calefacción y refrigeración es menor, 32,2 kWh/m², que para la construcciones de acero y madera, 34,3

kWh/m² y 33,5 kWh/m² respectivamente. Más allá de los valores específicos, se destaca la importancia del tipo de material y sistema constructivo en el comportamiento energético. Sistemas de prefabricación ligera lógicamente tienen una baja inercia térmica ya que esta depende directamente de la masa del material. Por el contrario, sistemas de prefabricación pesados tienen una mayor inercia que repercute en mejor control pasivo del amortiguamiento de la onda térmica.

Además, la percepción del confort térmico está ligada a la manera en la que se transmite el calor, en este sentido sistemas de radiación frente a la convección son percibidos mejor por los usuarios. Las construcciones pesadas basan en mayor medida sus estrategias climáticas en la absorción y radiación del calor, mientras que los sistemas ligeros suelen recurrir a sistemas de instalaciones de aire, que acondicionan mediante convección.

4.5.- Fin de vida. Etapa C

La etapa de fin de vida de los edificios es importante por los beneficios que aporta a futuras construcciones gracias a la reutilización y reciclaje de materiales, lo que al evaluarlo en su globalidad supone una reducción del impacto ambiental en el sector de la construcción.

Las ventajas o inconvenientes en la etapa de fin de vida están directamente relacionados con el tipo de unión entre elementos del sistema de prefabricación, las cuales pueden ser clasificadas entre químicas o mecánicas. Aquellos sistemas prefabricados que utilizan uniones mecánicas de junta seca permiten una mayor facilidad de desmontaje de la estructura y por lo tanto de una mejor separación y clasificación de los residuos.

Los procesos empleados para la deconstrucción (C1) del edificio son determinantes en la capacidad de reutilización y reciclaje de los materiales. Han de ser selectivos, mediante sistemas que permitan separar los materiales entre sí e intentando evitar demoliciones por voladura o sistemas de tracción de elementos estructurales que hacen más compleja la labor de separación de los residuos.

Pons et al. [22] realizó una comparación entre la realización de un colegio mediante un sistema no prefabricado frente a varios sistemas de prefabricación, uno de acero, otro de madera y otro de hormigón. En la fase de deconstrucción, el sistema no prefabricado generaba una mayor cantidad de residuos, 4178 kg/m², mientras que los sistemas de prefabricación de acero, madera y hormigón obtuvieron 1253kg/m², 2229kg/m² y 2490kg/m² respectivamente. A estos valores, los autores añadían el porcentaje de reciclabilidad de los anteriores sistemas, siendo en construcciones no prefabricadas un 5%, para estructuras de acero el 35%, aquella de madera el 45% y estructuras de hormigón el 25%.

Como puede observarse, sistemas prefabricados no solo requieren de una menor cantidad de material, sino que su aprovechamiento es mayor.

Sistemas de construcción prefabricada:		Etapa fin de vida (C)			Relación respecto al sistema referencia
		Deconstrucción (C1)	Tratamiento residuos (C3)	Vertido de residuos (C4)	
Integral pesada		=	=	+	
Integral ligera	Indicadores asociados	+	++	++	
Por componentes pesados		+	+	++	
Por componentes ligeros		++	++	++	

(=): desempeño ambiental equivalente | (+): beneficios en el desempeño ambiental | (-): detrimento del desempeño ambiental

Tabla 6 "Evaluación de los sistemas de prefabricación en la Etapa C - Fin de Vida".

Fuente: elaboración propia

4.6.- Síntesis de la evaluación global de los resultados

Todas estas valoraciones han permitido determinar cuáles son los beneficios existentes frente a la construcción convencional de los diferentes sistemas de construcción prefabricada en cada etapa del ciclo de vida de la edificación (tabla 7).

Etapa	Beneficio del sistema frente construcción convencional	Mód.	Unidad	Construcción prefabricada			
				Integral		Por componentes	
				Pesada	Ligera	Pesados	Ligeros
A1-3 Etapa de producto	Reducción materiales	A1-3	(kg/m ²)		X		X
	Reducción residuos		(kg/m ²)		X		X
	Reducción procesos		(MJ/m ²)				
A4-5 Etapa de construcción	Facilidad transporte a obra	A4	(kgCO ₂ -eq/m ²)		X	X	X
	Reducción procesos en obra	A5	(MJ/m ²)	X	X	X	X
	Reducción residuos	A5	(kg/m ²)	X	X	X	X
B1-7 Uso del edificio	Mejores prestaciones acústicas	B1		X		X	
	Mayores prestaciones frente al fuego	B1		X		X	
	Facilidad sustitución/ reparación	B3-4			X	X	X
	Facilidad en rehabilitación	B5			X		X
	Inercia térmica	B6		X		X	
C1-4 Fin de vida	Reciclaje materiales	C3			X	X	X
	Reutilización componentes	C3	(kg/m ²)		X	X	X
	Reducción residuos	C4			X		X

Tabla 7 “Beneficios ambientales de diferentes sistemas de prefabricación”.

Fuente: elaboración propia

5.- Conclusiones

En este artículo se han comparado los sistemas de construcción convencional frente a los prefabricados y cómo ambos se confrontan a través de la distinción por etapas que se utiliza en el Análisis de Ciclo de Vida. A pesar de que en la actualidad la prefabricación se trate cómo una única vía de optimización de recursos y de reducción del impacto ambiental, se ha evidenciado como ésta no es homogénea ni en su diseño ni en sus procesos. Por ello, en este artículo se ha profundizado en la distinción de los diferentes sistemas de prefabricación para buscar los beneficios que cada uno aporta, así como definir los retos a los que se enfrentan.

Se ha puesto de manifiesto como hoy día nos encontramos con falta de criterios para asignar materiales y procesos a las distintas etapas del análisis del ciclo de vida en los diferentes sistemas de prefabricación. Esto ha llevado a la utilización de metodologías de ACV simplificadas, donde las comparaciones bajo sistemas de referencia se realizan exclusivamente a partidas o procesos de obra reducidos.

Se ha resaltado la necesidad de tener en cuenta factores diferentes a los recursos consumidos y procesos de obra para poder realizar un estudio global y comparable entre los diferentes sistemas de prefabricación, como son las infraestructuras asociadas, el transporte, el peso, el cumplimiento de las exigencias básicas de habitabilidad, resistencia al fuego, la influencia del tipo de unión, etc.

Se evidencia la importancia de la coordinación dimensional y modular en todo el ciclo de vida de la edificación. Existe una responsabilidad desde el diseño influyente en la eficiencia de los trabajos, los residuos generados, así como los tiempos de fabricación, obra y vida de servicio de los materiales y productos, lo cual repercute directamente en el valor intrínseco económico y medioambiental de la edificación.

Se justifica cómo el desarrollo de los sistemas prefabricados por componentes ligeros posee mayores ventajas en el global del ciclo de vida de la edificación que la prefabricación integral. Esto se debe principalmente a su viabilidad en el desarrollo de mercados regionales, mayor viabilidad en el transporte, eficiencia en los procesos de construcción y su viabilidad en la construcción en seco, lo que permite la sustitución, revalorización y recuperación selectiva de materiales y productos. Sin embargo, en la fase de uso encontramos como el confort acústico o la resistencia al fuego marca una limitación que ha de ser resuelta correctamente en el diseño y

cómo la falta de inercia debe tenerse en cuenta para estrategias de adaptación climática (tabla 7).

Por tanto, en un contexto actual donde la gestión optimizada de los recursos naturales se convierten en factores primordiales para el desarrollo de los sistemas de construcción, poseer una visión conjunta de la prefabricación y el análisis ciclo de vida abrirá las puertas a una renovada industrialización, pues permitirá comprender la afección de cada uno de los procesos vinculados a cada sistema.

REFERENCIAS

- [1] European Union. (2014). Horizon 2020 Work Programme 2014-2015. Area of “Secure, Clean and Efficient Energy”.
- [2] Barrios, Á., Serrano, A. J., Lizana, F. J., & Mariñas, J. C. (2014). Architectural heritage in prefabrication. Protection and enhancement of the construction technique. In *The 4th International Conference on Heritage and Sustainable Development*. Guimarães, Portugal.
- [3] Águila García, A. del. (2006). *La industrialización de la edificación de viviendas*. Tomo I y II. Sistemas y Componentes. Madrid: Maireia Libros.
- [4] AENOR. UNE 41604 (1997). Construcción de edificios. Coordinación dimensional y modular. Principios y reglas (1997).
- [5] AENOR. UNE-EN ISO 14040. (2006). Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- [6] AENOR. UNE-EN ISO 14044. (2006). Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- [7] AENOR. UNE-EN 15804:2012+A1. (2014). Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.
- [8] AENOR. UNE-EN ISO 14025. (2010). Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos.
- [9] Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **29**, 394–416.
- [10] Sartori, I., & Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, **39**(3), 249–257.
- [11] Scheuer, C., Keoleian, G. A., & Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings*, **35**, 1049–1064.
- [12] Kofoworola, O. F., & Gheewala, S. H. (2009). Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand. *Energy and Buildings*, **41**(10), 1076–1083.
- [13] AEN/CTN198. UNE EN 15978. (2012). Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de Cálculo.
- [14] García, A. (2010). Análisis del ciclo de vida (ACV) de edificios. Propuesta metodológica para la elaboración de Declaraciones Ambientales de Viviendas en Andalucía. Tesis. Universidad de Sevilla.
- [15] Barrios, Á., & Lizana, F. J. (2013). Strategies for responsible consumption of buildings products. In *The 1st International Congress on Sustainable Construction and Eco-efficient Solutions* (pp. 243–256). Seville.
- [16] López-Mesa, B., Pitarch, Á., Tomás, A., & Gallego, T. (2009). Comparison of environmental impacts of building structures with in situ cast floors and with precast concrete floors. *Building and Environment*, **44**, 699–712.
- [17] Cole, R. J. (1999). Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems. *Building and Environment*, **34**, 335–348.
- [18] Lu, W., & Yuan, H. (2013). Investigating waste reduction potential in the upstream processes of offshore prefabrication construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **28**, 804–811.

- [19] Aye, L., Ngo, T., Crawford, R. H., Gammampila, R., & Mendis, P. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Buildings*, **47**, 159–168.
- [20] Wadel, G., Avellaneda, J., & Cuchí, A. (2010). La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales. *Informes de La Construcción*, **62**(517), 37–51.
- [21] Clough, R. H., & Orden, R. G. (1993). *Building Design using Cold Formed Steel Sections: Acoustic Insulation* (SCI Publication 128). Ascot, United Kingdom: The Steel Construction Institute.
- [22] Pons, O., & Wadel, G. (2011). Environmental impacts of prefabricated school buildings in Catalonia. *Habitat International*, **35**(4), 553–563.