

CAPÍTULO 8

PROPUESTA DE PROTOTIPO MODULAR PARA EL CIERRE DEL CICLO DE LOS MATERIALES

8.1 Planteamiento

El objetivo del presente capítulo es, a partir de las conclusiones del estudio comparativo sobre el sistema constructivo convencional y los sistemas modulares de hormigón armado, madera y acero realizado en el capítulo anterior, intentar establecer cuál sería el sistema constructivo óptimo desde el punto de vista de la reducción de los impactos ambientales detectados y del cierre del ciclo de los materiales.

La estructura del presente capítulo se compone de los apartados y contenidos que se explican a continuación:

- 8.1 Planteamiento, en el que se repasan los problemas ambientales encontrados en el análisis comparado de los cuatro sistemas constructivos efectuado en el capítulo anterior, así como también se desarrollan las principales maneras de responder a ellos.
- 8.2 Determinación de un prototipo modular optimizado, que comprende las opciones de mejora en las fases 1/6 de Extracción y fabricación de materiales, 2/6 de Transporte, 3/6 de Construcción, 4/6 de Uso, 5/6 de Mantenimiento y 6/6 de Desconstrucción. Se cierra con la descripción de la nueva configuración formal y constructiva del módulo, de acuerdo con la forma y las dimensiones del mismo edificio tipo considerado hasta ahora.
- 8.3 Análisis ambiental y de cierre de ciclo sobre el sistema modular optimizado, en el que tendrá lugar un estudio de las mismas características al realizado con el resto de los sistemas en el capítulo anterior. Esta evaluación abarcará las fases ya descritas y se cerrará con una comparación respecto de todas las alternativas vistas (convencional, y modulares de hormigón, madera, acero y optimizado) que incluirá la evaluación de cierre de ciclos.
- 8.4 Conclusiones, en las que se intentará reflejar una síntesis de los avances alcanzados y de los problemas detectados, para luego repasar los aspectos que deberán atenderse en el capítulo siguiente dedicado a la gestión industrial y comercial en la que debe asegurarse el cierre de ciclos.

El tipo de materiales empleados en los sistemas modulares descritos responde a la lógica desde la cual fueron concebidos, que no necesariamente responde a una componente ambiental. La razón para que los fabricantes emplearan el hormigón armado, la madera y el acero en cada caso seguramente responde a la tradición y los conocimientos de la empresa así como a la experiencia de sus técnicos, a ventajas comparativas en relación con precio de los materiales y sistemas, o al origen de las empresas puesto que en los tres casos analizados los fabricantes de los módulos son subsidiarios de grupos mayores con experiencia previa en las tecnologías del hormigón, la madera y el acero respectivamente.

Materiales directos		
	kg/m ²	%
Convenc.	2.961	285
Modular	1.038	100
Mod. opt.	205	20

Energía de fabricación		
	MJ/m ²	%
Convenc.	6.987	90
Modular	7.768	100
Mod. opt.	2.721	35

Emisiones de fabricación		
	KgCO ₂ /m ²	%
Convenc.	672	79
Modular	847	100
Mod. opt.	143	17

Materiales totales (MIPS)		
	Tm/m ²	%
Convenc.	7,4	232
Modular	3,2	100
Mod. opt.	1,0	34

Agua extracción/fabricación		
	Tm/m ²	%
Convenc.	23,8	119
Modular	20	100
Mod. opt.	7,4	37

Datos de la comparación realizada entre los sistemas constructivos convencional, modular estándar y modular optimizado tomando como base una vivienda unifamiliar de 60m². El sistema modular optimizado (sustitución de materiales por las mejores opciones posibles) presenta grandes posibilidades de reducción de impacto ambiental.

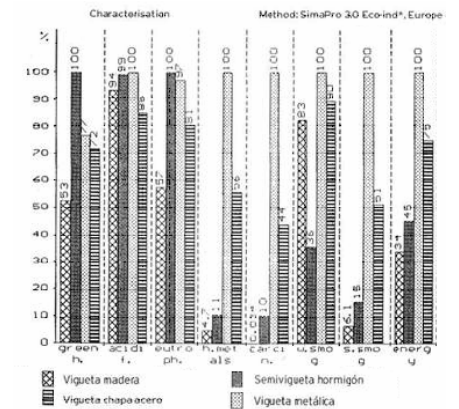
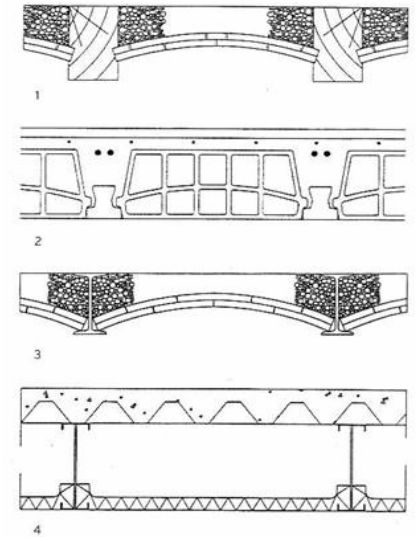
Wadel G. (autor), Avellaneda J. y Cuchi A. (coautores). *Sustainability in lightweight modular construction for housing*. Portugal SB'07, Lisboa, 2007

Desde una componente ambiental como la que da origen a este estudio el tipo de material a emplear responde a sus potencialidades respecto de la reducción del impacto ambiental y el cierre del ciclo de los materiales. De tal forma la búsqueda de un sistema modular optimizado que tendrá lugar en este capítulo no se centrará en un material en particular sino en todos aquellos que representen la mejor opción frente a cada función a resolver.

Un segundo aspecto de interés en esta búsqueda es establecer un criterio para la consideración de la relación entre impacto ambiental y cierre de ciclos que presentan las distintas opciones materiales. El acero, por ejemplo, tiene una mayor cantidad de energía de fabricación que el hormigón armado y esto hace que casi cualquier estructura realizada con el primer material sea energéticamente más intensiva y tenga, por tanto, mayor repercusión en otros efectos como por ejemplo emisiones de CO₂. Esta primera mirada sobre el problema parecería descartar la opción del acero, aunque si se consideran también las posibilidades de reciclaje de cada uno y por tanto su aptitud de cara a cerrar ciclos, la relación se invierte. Mientras que el acero puede hacerlo en un 100% (con la tecnología de arco voltaico) el hormigón registra tasas muy bajas (la nueva norma del hormigón EHE¹ permite la utilización de árido reciclado en apenas un 20% del agregado grueso) y por tanto un gran volumen de residuos cuyo destino es el infraciclaje o el vertido. Este problema, con variantes, se produce en numerosas combinaciones de materiales y no es fácil de resolver.

En capítulos anteriores ha sido dicho que el consumo energético en sí mismo, sin estar asociado a una fuente concreta, no permite la cuantificación precisa del impacto ambiental. Si fuera cubierto completamente mediante energía renovable o, si por el contrario, la fuente energética fuera el carbón en combustión abierta los efectos ambientales serían muy diferentes. Aunque tales antagonismos no existen en el sector de la producción de materiales, donde excepto en casos puntuales la energía empleada proviene de fuentes primarias fósiles, nucleares y en menor medida de renovables, ello podría cambiar en el futuro si hay un giro hacia el cierre de los ciclos materiales². Se alteraría así, por tanto, el orden más usualmente empleado en la clasificación los materiales según su impacto ambiental, es decir el que surge de considerar la energía y las emisiones de CO₂ asociadas a la extracción y fabricación de a cada uno de ellos.

Lo anterior deja, entre otras incertidumbres, la duda respecto de si es mejor escoger los materiales bajo el criterio del menor consumo energético y/o emisiones de CO₂ asociadas posible o bien si debe prevalecer la condición de la máxima incorporación de reciclados en la fabricación junto con el reciclaje efectivo una vez ha finalizado su vida útil. Energía incorporada o cierre de ciclos. Habida cuenta de que no parecen haber suficientes razones como para decantarse absolutamente por una de las dos opciones, y que además ambas se



Comparativa de impactos ambientales entre cuatro tipos de forjados. Las opciones de materiales naturales y las de muy bajo consumo de materiales industrializados obtienen los mejores resultados.

[ITeC, COAC, UPC 1996] N. Casado et al., *La Enseñanza de la Arquitectura y el Medio Ambiente*, Programa Life, Colegio de Arquitectos, Instituto de Tecnología de la Construcción y Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 1996.



Algunas alternativas materiales que se tendrán en cuenta: cimentaciones de gaviones de piedra reciclada, aislamiento térmico de lana de oveja y paneles de madera con incorporación de materiales naturales pesados para inercia térmica.

encuentran íntimamente ligadas, en esta etapa del trabajo se intentará responder a ambas, es decir seleccionar los materiales según representen la mínima energía y emisiones de CO₂ incorporadas y los máximos niveles de materia reciclada y efectivamente reciclable.

Un tercer aspecto a tener en cuenta es el grado de proximidad respecto a las condiciones del mercado que pueda observarse en la determinación de materiales, componentes, técnicas constructivas, etc., a utilizar en la versión optimizada del sistema modular. Si bien restringirse absolutamente a lo existente implicaría una limitación respecto de las posibilidades experimentales y de innovación de la idea a desarrollar, no hacerlo en absoluto la alejaría de sus posibilidades de aplicación real en el futuro. Anteriormente ha sido dicho que este estudio intenta demostrar que resulta viable una arquitectura que, sin pretender resolverlo todo ni ser un modelo para un uso masivo, se aproxime significativamente al cierre del ciclo de los materiales. De hecho, ésta es la razón por la cual en el capítulo anterior han sido estudiados unos sistemas constructivos específicos y vigentes en el mercado. Se pretende llegar a unas conclusiones de cambio ambiental para un sector de la construcción determinado, el de la prefabricación ligera para la vivienda, cuya aplicación sea posible.

De tal forma, el enfoque de la búsqueda de alternativas constructivas también deberá atender a las condiciones del mercado, seleccionando en primer lugar materiales y componentes cuya existencia sea demostrable y, en segundo lugar, opciones experimentales que al menos hayan sido probadas en casos reales aunque con algunas excepciones³. La dispersión del ámbito geográfico para la obtención de estos productos naturalmente enfrentará las restricciones del impacto ambiental del transporte, de modo que se privilegiará el origen local.

Tenidas en cuenta las tres cuestiones reseñadas, utilizar diferentes materiales según su aptitud para resolver adecuadamente las distintas partes del sistema constructivo, abordar simultáneamente la energía incorporada, las emisiones de CO₂ y la condición reciclado/reciclable como criterio de selección y, por último, un cierto nivel de restricción respecto de la disponibilidad de alternativas existentes en el mercado o bien productos experimentales suficientemente probados, no debe perderse de vista la consideración de la totalidad del ciclo de vida del edificio.

Si bien esta tesis se centra en el cierre del ciclo de los materiales y por tanto las etapas de extracción y fabricación, construcción y desconstrucción concentran la atención, tal como ha sido visto es en el uso del edificio donde se concentra la mayor parte del impacto ambiental. La evaluación de un mismo edificio materializado a través de cuatro sistemas constructivos diferentes respecto, fundamentalmente, del gasto de energía y emisiones CO₂ de asociadas a la climatización, el agua caliente sanitaria, la iluminación y otros

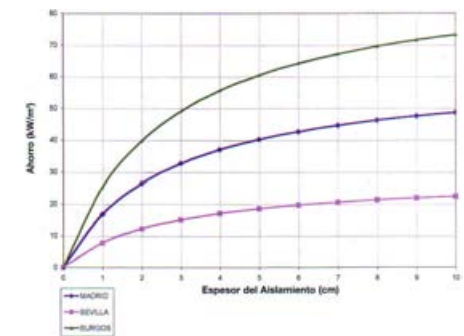
usos, ha dejado conclusiones que deben ser retomadas en adelante. Se decía en el capítulo precedente que la falta de inercia térmica en los sistemas ligeros hacía que, en climas donde prevalecen las temperaturas elevadas en gran parte del año y por tanto aumenta la demanda de la refrigeración, la incorporación de aislamiento térmico encontraba un límite en la búsqueda por reducir el gasto energético. Más allá de este límite, al que se llega en el momento en que un nuevo aumento del grueso de aislamiento no aporta ya una reducción importante de la demanda, comienza la consideración de otro efecto de importancia, que es la inercia térmica. Los sistemas ligeros no tienen inercia térmica y, por tanto esta limitación de acondicionamiento natural debe ser atendida mediante mecanismos ajenos a ellos, es decir incorporando una masa adicional que mejore el comportamiento térmico del conjunto. Cómo y dónde estos materiales pesados deben agregarse será ensayado más adelante a partir de criterios bioclimáticos [Serra et al. 2000], [Neila 2005], [IBO 2008], [Hegger et al. 2008], consideraciones constructivas y mediciones de demanda con la misma metodología de simulación energética ya empleada.

Habiendo descrito ya las principales preocupaciones a atender en algunas etapas del ciclo de vida del edificio, resta considerar las fases de transporte y mantenimiento.

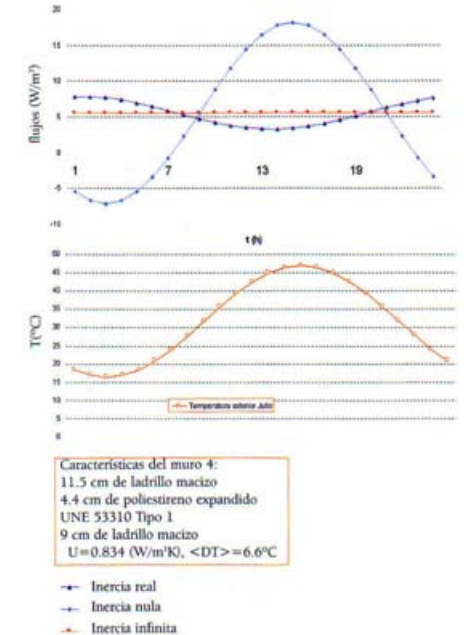
Respecto del transporte, ha sido visto que el desplazamiento de módulos entre la fábrica modular y la obra puede llegar a tener una repercusión significativa ya que cuando excede el ancho estándar máximo de 2,5 m se realiza con camiones especiales y escoltas. Este equipo, dadas sus características especiales, realiza el recorrido de regreso sin carga, doblando el impacto ambiental en este tramo del transporte. La manera de revertir este problema parece encontrarse en el ajuste de la carga a las dimensiones máximas estándar para que sea posible utilizar camiones convencionales y sin escoltas, que puedan emplearse en cualquier uso una vez descargados los módulos en obra, aspecto que será estudiado en este capítulo.

Por lo que hace al mantenimiento resulta claro que se debe evitar la utilización de materiales que requieren conservación periódica en la que intervienen productos con alto impacto ambiental. Esto resulta evidente, por ejemplo, en el caso de la madera cuando la capa de acabado se resuelve mediante barnices sintéticos y es renovada cada dos años. Durante el tiempo en que el edificio se encuentra en uso se acumulan de esta forma elevados valores de energía incorporada, emisiones asociadas, toxicidad, etc., que pueden malograr un buen resultado inicial alcanzado en las etapas de extracción y fabricación o construcción. Considerar los máximos niveles de durabilidad, la mínima intervención de materiales de mantenimiento y el empleo de productos de bajo impacto [Wooley, Kimmins 2000], [Ayunt. Madrid 2007], [WRAP 2007], [ACS 2008] es parte de la búsqueda a realizar.

Influencia del espesor del aislamiento



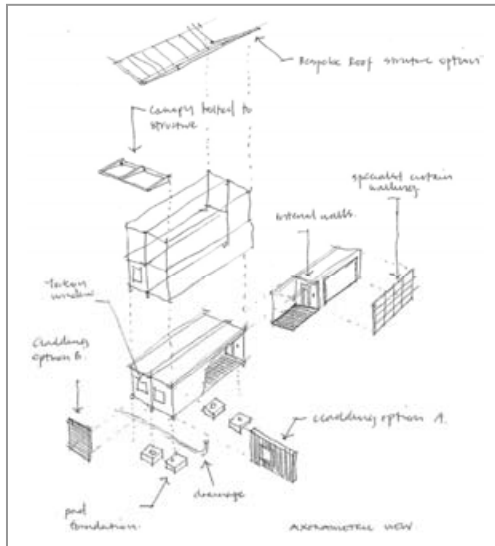
Influencia de la inercia térmica



Estudio del comportamiento de capas de aislamiento e inercia térmica en cerramientos exteriores y su posible influencia en la demanda de energía de climatización de los espacios interiores. *Fundamentos de la calificación energética, IDAE*

8.2 Determinación de un prototipo modular optimizado

Fase 1 de 6 Extracción y fabricación de materiales



Despiece de un sistema modular ligero (Yorkon)

Ha sido dicho antes en este estudio que la principal estrategia de mejora respecto de los materiales de construcción es la disminución de las cantidades empleadas combinada con la búsqueda de las alternativas de menor impacto. La construcción modular ligera, que busca el mínimo peso para facilitar el transporte y el montaje [Staib 2008], como ha sido visto tiene un consumo de materiales finales de entre 150 a 250kg/m² para el módulo habitable (sin contar la repercusión de las cimentaciones). A partir de ello la consideración de la reducción las cantidades no presenta demasiadas oportunidades, ya que todas las soluciones constructivas se encuentran casi en el límite de la menor utilización posible de materia. Sí resulta oportuno, en cambio, estudiar el reemplazo de los materiales que, como el cemento, ciertos metales, plásticos, pinturas, etc., han presentado valores elevados en varios indicadores como energía de fabricación y emisiones asociadas o reciclabilidad. De tal forma, los criterios de mejora en esta etapa se centran en la búsqueda de alternativas en materiales naturales renovables, reciclados y reciclables y de baja energía y CO₂ incorporados [Reinberg 2008], [Oliva 2001], [IBO 2008]. Teniendo presente que una vez pasada la puesta en obra deberán prestar servicio al menos 50 años (vida útil considerada en este estudio), a tales criterios de búsqueda se le añade una alta durabilidad y un mantenimiento de baja frecuencia e impacto ambiental. En algunos casos hay más de una opción técnicamente viable. El acabado de fachadas y cubiertas, por ejemplo, plantea la posibilidad de utilizar chapa acero galvanizado o bien de aluminio, pudiéndose disponer de productos reciclados entre un 80% y un 100% en ambos casos. La selección a realizar intentará combinar equilibradamente distintos criterios: trabajar con el mínimo número de materiales posible, favorecer las opciones de impacto menor y estudiar las posibilidades de gestión en ciclo cerrado para diversos materiales. Desde este último punto de vista emplear chapa de aluminio, aunque suma un material a la lista a gestionar, tiene interés debido a que conecta con un sector industrial donde se están produciendo innovaciones de reciclaje de gran de interés⁴. A efectos de considerar los distintos impactos y potencialidades ambientales de los materiales más utilizados en los sistemas constructivos estudiados así como los que se proponen para el módulo optimizado ha sido realizado un estudio basado en la bibliografía existente [Hegger et al. 2006], [Hammond, Jones 2007], [Wooley, Kimmins 2000] que se reseña en el Anexo 6 Fichas sobre impacto ambiental de los materiales. La asociación de las características buscadas respecto de los materiales existentes en el mercado, que cabe aclarar que en algún caso no alcanza a cubrir todas las exigencias

Energía gris de los materiales [MJ/kg]

	No reciclado	Reciclado
Aluminio	180-215	22,5
Acero	35	11,7
Cobre	150	50

	Sintético	Natural
Poliuretano	62,5	
Lana de oveja		14,6
Barniz sintético	100	
Barniz natural		30

Variación de la energía de extracción y fabricación de diversos materiales en función de su origen reciclado o no reciclado y sintético o natural.

Fuentes: [TeC BEDEC 2006], [Hammond, Jones 2007], Societat Orgànica.

normativas⁵, ha dado lugar a la siguiente selección (todos ellos son productos reciclados y reciclables salvo en los casos en que se realiza alguna aclaración). La descripción detallada de los elementos constructivos se encuentra en las mediciones de los anexos.

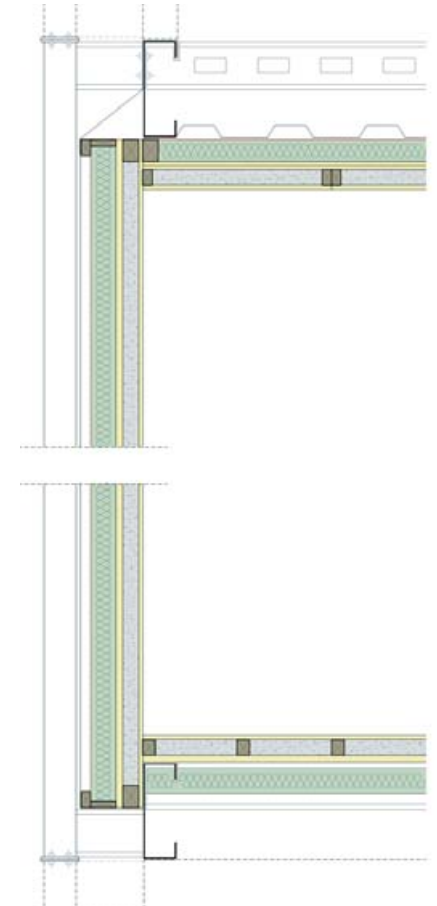
Construcción bajo rasante:

- Cimentaciones de gaviones de piedra y jaula de acero galvanizado sobre capa de grava en zanjas de cimentación (cuya dimensión depende de las condiciones del suelo).
- Instalaciones de evacuación de tuberías de polipropileno sobre lecho de grava.

Módulo de vivienda:

- Elementos estructurales verticales y horizontales en perfiles de acero laminado proveniente de horno de arco voltaico, galvanizados.
- Forjado con cerramiento de tablero de madera, aislamiento térmico de lana de oveja y capa de grava para inercia térmica y aislamiento acústico.
- Fachada con acabado exterior de chapa de aluminio sobre rastreles de madera, lámina impermeable transpirable, aislamiento térmico de lana de oveja, estructura de madera, capa de grava para inercia térmica y revestimiento interior de tablero de madera contrachapada.
- Cubierta con cerramiento de chapa de aluminio, rastreles y subestructura de madera, lámina impermeable transpirable, aislamiento térmico de corcho, estructura y tablero interior de madera.
- Carpinterías y protecciones solares (porticones) de madera laminada, vidrios cámara no sellados (clipados, atornillados, desmontables) para permitir su reciclado.
- Particiones interiores con estructura de madera, aislamiento acústico de lana de oveja y revestimiento de tablero de madera contrachapada.
- Pavimentos de losetas flotantes de corcho con acabado de ceras naturales, zócalos de madera.
- Mobiliario de estructura de madera y acero de horno de arco voltaico, cerramientos de tablero de madera contrachapada.
- Revestimientos y acabados: barnices naturales sobre superficies interiores de madera y porticones, placas de piedra natural de reducido espesor fijadas mecánicamente en zonas húmedas y ningún tratamiento sobre acero galvanizado y aluminio exteriores.
- Instalaciones con tuberías y accesorios de polipropileno y polietileno, cables de cubierta de plástico y conductores de cobre, ambos reciclados.
- Captación solar térmica y fotovoltaica de una superficie de 80 m² en cada caso, con paneles ubicados en la cubierta y las barandillas de las plantas superiores.

Sistema modular optimizado, sección transversal



La secuencia de capas de materiales, de dentro hacia fuera, es tablero perforado de madera aglomerada (19 mm), grava reciclada (50 mm), estructura de listones de madera (50 mm), tablero de madera aglomerada (22 mm), manto de lana de roca (40 a 120 mm según la zona climática), estructura de listones de madera (40-120 mm), membrana transpirable (120 g/m²), enrastrelado de madera (25 mm) y chapa de aluminio reciclado (0,08 mm).

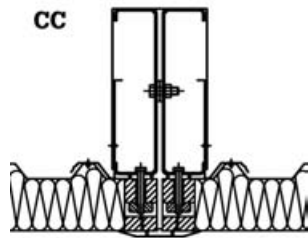


- Instalaciones de reciclado de aguas grises (3 m³/día) y de almacenamiento de agua de lluvia (60 m³), con sus correspondientes filtros, bombas y tendidos de tuberías.

Módulos de galería:

- Estructura horizontal y vertical, así como barandillas de perfiles de acero de horno de arco voltaico, galvanizados.
- Cubierta de chapa plegada de aluminio sobre rastreles de acero galvanizado
- Pavimentos de madera maciza con tratamientos de preservación naturales

Fase 2 de 6 Transporte



En 1968 se formula la norma ISO⁶ número R-668 que regula las dimensiones de contenedores de transporte según el sistema de medidas anglosajón a partir de un ancho de 8' (2,438 m) y diversos largos, siendo los más habituales los de 19'10,5" y 40' (6,058 y 12,192 m). La altura es variable, oscilando entre 8,6' y 9,6' (2,591 y 2,896 m). En 1970 otra norma ISO, la R-1161, estipuló los ángulos de fijación, útiles tanto para el izado de los módulos como para su anclado durante el transporte. También los pesos totales máximos fueron estandarizados, situándose en 24 t para el contenedor de 20' y en 30,48 t para el de 40'. Actualmente el sistema de contenedores basados en normas ISO es dominante en todo el mundo en el movimiento de cargas no a granel, lo cual implica la disposición de una logística (camiones, trenes, barcos, grúas y elevadores, sistemas de almacenamiento, gálibos y anchos de paso en puentes y túneles, etc.) muy extendida y de bajo coste respecto de otras modalidades.



Módulo de un lateral abierto protegido con láminas impermeables durante el transporte y montaje (Rollalong). Sistema de junta de cubiertas cuando no existe cerramiento vertical en una de las caras (Yorkon). Resultado de la formación de un espacio interior mediante la adición de diversos módulos, algunos de ellos sin cerramientos verticales (Lot-ek).

A partir de lo anterior encajar las dimensiones de los módulos habitables en las normas ISO implica, además de disponer de una oferta de transporte amplia y de bajo coste, reducir el impacto ambiental de esta etapa del ciclo de vida. No son necesarios ni equipos especiales ni vehículos de acompañamiento, las grúas a emplear son de bajo tonelaje y además todos los medios de transporte pueden ser reaprovechados para cualquier otro tipo de cargas de contenedor una vez han trasladado los módulos. Todo ello optimiza el transporte entre la fábrica modular y la obra, respecto de los escenarios estudiados en el anterior capítulo, ya que reduce al mínimo posible la utilización de equipos así como también emplea aquellos que tienen menor consumo energético.

Ajustar las dimensiones de los módulos habitables a las normas ISO no plantea grandes dificultades en cuanto a la altura ya que el alto máximo de 2,896 m deja casi 30cm de espesor para resolver los forjados, ni en cuanto a la profundidad ya que existen módulos de hasta 53' o 16,1544 m, medidas que superan la ampliamente profundidad edificada de los

ejemplos estudiados (11-12m). El peso máximo de carga, de unos 1.650 Kg/m² supera ampliamente los valores de la construcción ligera. El problema se centra en el ancho máximo de 2,438 m y, más específicamente, en el ancho libre interior que descontando unos 20 cm mínimos a cada lado se situaría en apenas algo más de dos metros, una dimensión que no permite la mínima funcionalidad que exige la célula de vivienda estudiada. La solución es, como ya ha sido anunciado antes, resolverla empleando el ancho de dos módulos (4,876 m exteriores y aproximadamente 4,476 m interiores). Ello supone la realización una junta longitudinal en forjados y paredes, así como también que durante el transporte una de las caras largas de los módulos debe protegerse con un cerramiento temporal de fácil colocación y remoción.

Fase 3 de 6 Construcción

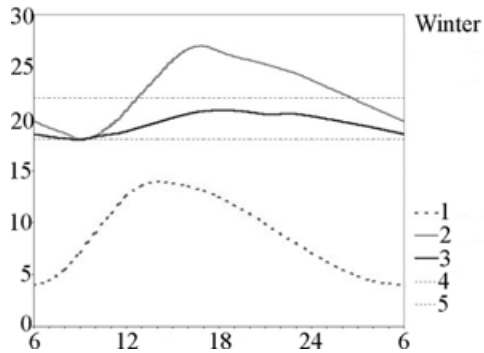
El impacto ambiental de la etapa de construcción se concentra en la generación de residuos y otros efectos (energía y emisiones incorporadas, etc.) de la parte de obra que se realiza in situ, básicamente cimentaciones e instalaciones de evacuación, y en el uso de energía (y sus efectos asociados) empleada en las operaciones de montaje de los módulos de vivienda y galería, principalmente grúas y otras máquinas complementarias.

En cuanto a la construcción in situ el problema es que la utilización de sistemas convencionales en la ejecución de bases y zapatas de cimentación no permite recuperar los materiales por las mismas razones ya explicadas respecto del hormigón armado en general (dificultades en la separación selectiva y en el reciclado de la parte de hormigón) e incluso dificulta su extracción ya que se trata de demolición bajo rasante. Otro aspecto a considerar es que las cimentaciones, en el caso de la construcción ligera, se encuentran sobredimensionadas. El tamaño de las mismas depende de tres aspectos fundamentales: las condiciones del suelo, las cargas a trasladar al terreno y los mínimos normativos que responden a las condiciones de la construcción convencional, es decir a cargas y coeficientes de seguridad que tienen en cuenta un peso de superficie edificada de unas dos toneladas por metro cuadrado. Resumiendo, el problema se centra en la utilización de sistemas constructivos que impiden la recuperación de materiales y en el dimensionado, además de las condiciones del suelo que varían de un sitio a otro. Respecto de la primera consideración, se trabajará con soluciones alternativas recuperables⁷ consistentes como se ha dicho en gaviones de piedra y malla de acero galvanizado, ambos reciclados, que se instalarán en cotas de baja profundidad ya que desde el punto de vista del cierre de ciclos es preferible aumentar la superficie de repartición de cargas que dificultar la recuperación de materiales. Por lo que hace a la segunda, es decir al dimensionado según normativa, no

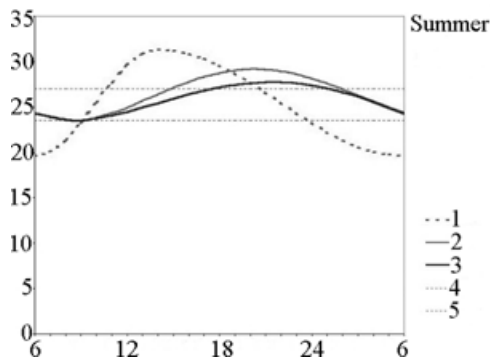


CARACTERÍSTICAS:	
POTENCIA DE LA GRUA:	54 TON. /METRO
LONGITUD DE PLUMA:	22 METROS
LONGITUD DE CAJA:	8 METROS
POTENCIA EN CORTO:	9.000 KILOS
POTENCIA A 12 Mts:	1.650 KILOS
MANDO A DISTANCIA:	SI
CABRESTANTE:	SI
OBSERVACIONES:	
Camión grúa de 54 toneladas todo terreno 8x4 preparado para el transporte y manipulación de grandes cargas tanto en peso como en volumen.	

Arriba: el sistema de coordinación modular ISO R668 permite que los módulos sean operables por todos los modos de transporte e izado. Al centro y abajo: Camión de 54 toneladas equipado con caja y grúa que permiten el transporte y el montaje de las unidades consideradas en este estudio. Consulta en línea, 07/08 <http://www.guybrush.es/portafolio/agudo/vehiculos.html>



Referencias de temperaturas: 1 Exterior, 2 Interior en un día soleado, 3 Interior en un día nublado, 4 Límite inferior de confort térmico y 5 Límite superior de confort térmico.



Simulación de módulos ligeros (cerramientos de panel sándwich de chapa lacada y espuma de poliuretano) para un día promedio de verano e invierno respectivamente, mediante el programa Balanç (A. De Bobes, J. A. Tribó) y realizada por Anna Pagés.

La temperatura interior en días soleados, tanto en verano como en invierno, es superior a la máxima de confort térmico. También en días nublados en verano. Esto puede controlarse mediante la incorporación de inercia térmica.

G. Wadel, J. Avellaneda y A. Cuchi, *Sustainability in lightweight modular construction for housing*. Portugal SB'07, Lisboa, 2007

será tomada en cuenta sino que las cimentaciones serán diseñadas respondiendo exclusivamente a las condiciones de carga y de suelo respectivamente. Y, finalmente, respecto de las condiciones de suelo, teniendo en cuenta que no se dispone de una localización exacta ni unas tensiones admisibles propias del solar, se adopta un valor promedio de resistencia a cargas verticales d

En cuanto al montaje de los módulos y respecto de los medios empleados en el análisis realizado sobre los dos sistemas ligeros (madera y acero) es posible realizar una mejora de ahorro energético. El módulo a emplear (de 2,44x8,00 m) pesa unos 7200 kg, (3000 kg de construcción y 4200 kg de gravas agregadas para inercia térmica) lo cual permite la utilización de camiones grúa en las cuatro plantas del edificio. Esto quiere decir que, si se dispone de suficiente espacio en el terreno para el movimiento de equipos, en la ejecución de la mitad del edificio puede prescindirse del equipo auxiliar, montándose los módulos mediante la utilización del mismo camión que los transporta.

Fase 4 de 6 Uso

La búsqueda de mejoras sigue las estrategias de disminución de la demanda (pautas de uso de los habitantes, aislamiento, inercia térmica, ventilación natural, etc.), aumento de la eficiencia (equipos e instalaciones de mayor rendimiento), e incorporación de energías renovables (aumento de solar térmica, e incorporación de geotérmica y fotovoltaica).

La simulación de la demanda energética de climatización realizada en el capítulo anterior con los programas informáticos LIDER y Ecotect confirmó entre otras cosas el supuesto de que los módulos construidos con sistemas ligeros, es decir los de madera y acero, presentarían problemas de acondicionamiento en climas cálidos. En efecto, en la simulación realizada para la localización de Sevilla, zona B4, la demanda de refrigeración resultaba muy elevada, situándose en el 73% del total en ambos sistemas. En el caso de los módulos de acero incluso llegaba a superar la limitación prevista por la normativa vigente para refrigeración, en el Documento Básico HE1 del CTE. La incorporación de un mayor espesor o calidad de aislamiento térmico, algo que fue expresamente probado, no solucionaba el problema debido a que con los ocho centímetros de espuma de poliuretano se había llegado al límite de utilidad térmica, algo que resulta coincidente con el gráfico estadístico que se adjunta.

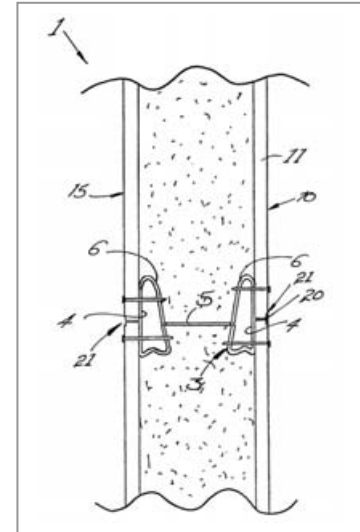
Queda claramente expresado que es necesario, desde el punto de vista normativo, y deseable, para la máxima eficiencia energética, incorporar materiales con masa en la envolvente para que actúen como acumuladores térmicos. Un efecto que en zonas cálidas permitiría desfazar los efectos del clima sobre el espacio interior mediante el

aprovechamiento de las diferencias de temperatura a lo largo del ciclo del día y la noche, aplanando la curva de las ganancias de calor en el espacio habitable.

La intención en esta etapa del estudio es probar diferentes alternativas de incorporación de inercia térmica, siempre dentro de las exigencias del cierre del ciclo de los materiales y sin dificultar las operaciones de transporte y carga con elevados pesos, habiéndose pensado en tres alternativas materiales: las gravas recicladas, el agua y, ocasionalmente, los materiales de cambio de fase³. Mediante la utilización de los programas de simulación energética mencionados en el primer caso se probará la repercusión que tendría en la demanda la disposición de una capa de 5 cm de gravas recicladas en las caras interiores de los forjados, las cubiertas y las paredes exteriores. El en segundo caso, que plantea cierta precaución constructiva respecto del riesgo de infiltraciones del agua confinada así como la duda respecto de la repercusión ambiental de los recipientes a utilizar (habitualmente contenedores metálicos, plásticos, etc.), se estudiará el efecto de un volumen equivalente al de la grava, pero de agua. La cantidad de material empleada, sea grava o agua, en ninguno de los casos supone una carga superior a los 3.500 kg que como se ha explicado en el punto anterior suponen un total de 6.500 kg para cada módulo, un peso con el que tanto los camiones como las grúas previstas pueden trabajar.

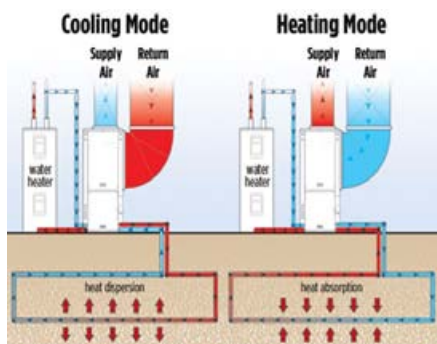
Estas modificaciones estarán acompañadas por una revisión respecto de los acristalamientos (panel de vidrio cámara reflectivo y bajo emisivo DC 4-20-6 con un valor U de 2,70 y un factor solar de 0,75) y las protecciones solares (balcones y persianas enrollables) utilizados en las carpinterías, a efectos de verificar si aún es posible mejorar su comportamiento respecto de la demanda energética en la localización escogida.

También serán revisados el tipo de equipos y sus coeficientes de rendimiento empleados en los cálculos del capítulo anterior para las instalaciones de calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria, es decir aquellos usos que han sido contemplados directamente en el gasto energético de la etapa de uso y por tanto forman parte de la contabilización en el ciclo de vida⁸. Respecto de la calefacción, la hipótesis considerada era un sistema de radiadores alimentados por agua calentada en una caldera de condensación a gas con un rendimiento de 0,95 (energía de red consumida respecto de energía térmica aportada). Este equipo, que extiende su uso al agua caliente sanitaria, será substituido por opciones más eficientes. Se ensayará la opción de las bombas de calor con intercambio geotérmico que, si bien suponen una parte de la instalación que resulta difícil de recuperar (las tuberías de intercambio con el suelo, enterradas en pozos y zanjas), tienen rendimientos promedios mucho más altos que los considerados. Se estudiará si esta pérdida de material resulta compensada con el ahorro energético y de emisiones asociadas a lo largo del ciclo de vida. Para determinar el COP



Arriba: una de las tantas patentes de tabiquería interior ligera con incorporación de materiales aislantes acústicos (habitualmente gravas) que existen en Estados Unidos.

Abajo: relleno de la cámara de una pared de tableros de yeso mediante inyección de aislamiento.



Esquema del circuito de intercambio térmico con el subsuelo y de la bomba de calor eléctrica tenida en cuenta en los cálculos de consumo de energía y de emisiones de refrigeración, calefacción y agua caliente sanitaria en este estudio.

Consulta en línea, 02/2009 www.energiaui.com

(coeficiente de rendimiento) a considerar en el calentamiento de agua de calefacción y sanitaria serán tenidos en cuenta valores promedios de referencia, a través de la consideración de casos reales y estudios de referencia situados en Cataluña.

Por lo que hace a la contribución solar del agua caliente sanitaria, anteriormente había sido tenido en cuenta un 60% considerado como promedio de la aplicación de las normativas vigentes⁹. No obstante, en esta revisión será considerado el máximo exigible del 70%¹⁰ teniendo en cuenta que la disposición del edificio, de altura media y planta extendida, en principio dispone de suficiente espacio como para alojar los captadores necesarios (unos 80 m²) en la cubierta o las barandillas de balcones y accesos. También se incorporará una cantidad equivalente de captadores fotovoltaicos a efectos de reducir el consumo eléctrico no renovable. Naturalmente los materiales de estas instalaciones serán integrados en el análisis a realizar.

La refrigeración anteriormente era proporcionada mediante una bomba de calor aire-aire con un rendimiento o COP de 1,9. En el nuevo esquema el sistema integrará una bomba de calor combinada con geotermia, por lo que su rendimiento se verá aumentado.

Otro cambio que será tenido en cuenta es el paso de equipos individuales a uno centralizado que se ubicará en una de las unidades modulares, prevista en el proyecto original para alojar las instalaciones comunes, que atenderá la demanda de 31 unidades.

Finalmente serán revisadas las pautas de uso consideradas, teniendo en cuenta también en este aspecto un escenario de mayor eficiencia¹¹ acorde con el planteamiento general del proyecto de estudio suponiéndose, por ejemplo, un correcto uso de las protecciones solares móviles y de la ventilación natural así como otros mecanismos de ahorro.

Fase 5 de 6 Mantenimiento

Tal como ha sido dicho anteriormente, en el análisis de los sistemas modulares ha sido detectado que ciertos materiales de baja durabilidad y alto impacto ambiental implican una repercusión negativa durante la fase de mantenimiento, pudiendo llegar a revertir un buen resultado alcanzado en la fase de extracción y fabricación. En consecuencia se ha determinado que los criterios para contrarrestar esta situación son: utilizar materiales de mayor durabilidad, disminuir las cantidades a emplear y escoger las opciones de menor impacto (materiales naturales renovables, materiales industriales completamente reciclables, de baja energía incorporada, etc.).

A partir de ello y teniendo en cuenta los mismos parámetros de durabilidad ya considerados [ITeC 1991] se reemplaza la mayoría de los materiales que tenían una vida útil inferior al ciclo de vida del edificio considerado, intentando que alcancen un idéntico período

de 50 años (por ejemplo las carpinterías de chapa de acero por madera laminada o los tableros de madera por chapa de aluminio reciclado en fachadas). También se eliminan los materiales que suponen un consumo frecuente de productos de mantenimiento (por ejemplo el imprimado y pintado periódico por simplemente galvanizado en las estructuras de acero, o los revestimientos exteriores ya citados). Por último, se sustituyen, especialmente en los casos de corta durabilidad, los materiales de alto impacto ambiental por opciones naturales o completamente reciclables (es el caso de los revestimientos sintéticos adheridos, en las zonas húmedas interiores, por aplacados de piedra natural de reducido espesor fijados mecánicamente para poder ser separados en la desconstrucción).

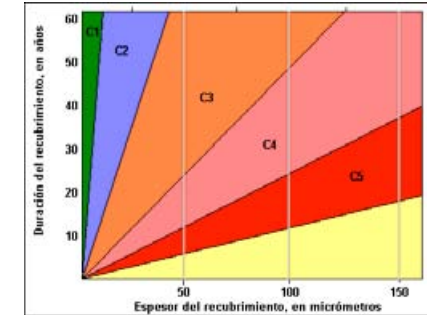
Fase 6 de 6 Desconstrucción

El impacto ambiental de la fase de desconstrucción se verá reducido, especialmente en lo que respecta a la generación de residuos o las alteraciones permanentes sobre el terreno, con la sustitución de cimentaciones *in situ* de hormigón armado por gaviones de piedra natural y acero galvanizado reciclados, ya comentadas en la fase de extracción y fabricación de materiales.

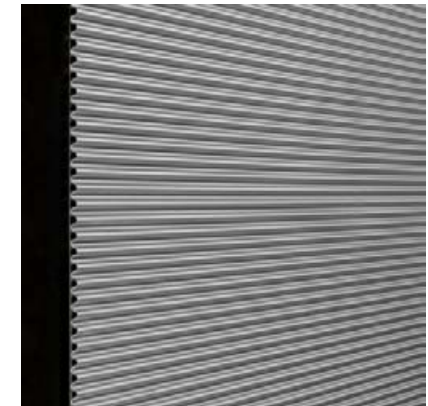
Otro aspecto importante a desacatar entre las mejoras es la utilización exclusiva de juntas reversibles, materiales no adheridos (o, en el caso de serlo, de materiales compatibles respecto del reciclado), que favorecerán la separación selectiva y por tanto las posibilidades de reutilización directa, rehabilitación o reciclado de materiales. Se pretende aún mejorar el bajo nivel de recursos enviados a vertedero que estadísticamente registra la industria de la construcción modular [WRAP 2007-4], incluidos los materiales de cimentaciones. Es de prever que especialmente en algunos productos de las instalaciones es donde se encontrarán más dificultades para ello. Finalmente, la reducción de tipos de materiales empleados a unos pocos hará más sencilla la gestión para el reciclado, simplificándose la separación selectiva y necesitándose de un menor número de recicladores o gestores especializados.

Nueva configuración de módulo

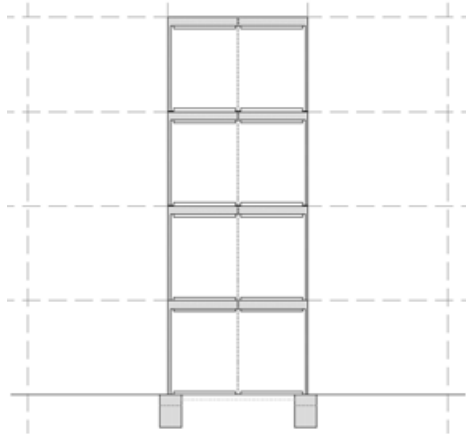
En las conclusiones del capítulo 7 y en el apartado sobre transporte de éste ha sido dicho que, a efectos de reducir el impacto del desplazamiento y sin recurrir a transporte especial¹², la célula de vivienda sería resuelta mediante dos módulos. De tal manera se emplean dos unidades de 2,44 m (8') de ancho por 9,14 m (30') de profundidad que se fabrican con una de sus caras largas sin cerramiento. Estos módulos en U (tres caras cerradas) forman una



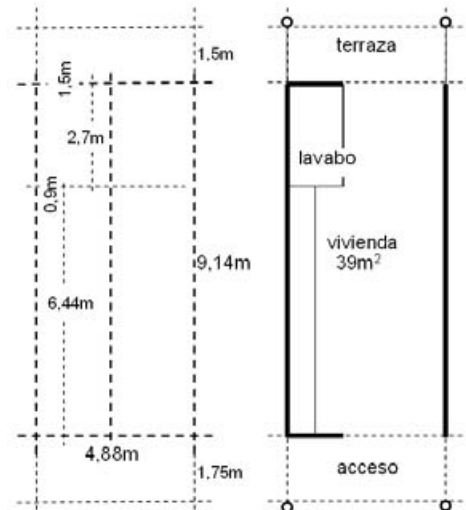
Esquema de durabilidad de la capa de galvanizado en piezas de acero en función del grosor del recubrimiento, teniendo en cuenta para la estructura del edificio de estudio (Ateg).



Los revestimientos exteriores (testeros y cubiertas) están resueltos en chapa plegada de aluminio de 0,8mm de espesor. Su durabilidad alcanza la del propio en este estudio, es decir 50 años.



Sección del edificio mostrando los pórticos de soporte estructural de las unidades modulares que descansan sobre muros de cimentación formados por gaviones, cuya carga máxima sobre el terreno es de 1,7kg/cm².



Unidad de vivienda de 39 m² útiles formada por dos módulos de 2,44 m x 9,2 m apareados.

unidad de vivienda de 4,88 m (16') de ancho por 9,14 m (30') de profundidad, con una superficie total de 44,6 m² y un área útil de unos 39 m².

Trabajar con módulos que tienen un lado abierto supone la necesidad de protegerlos del ambiente exterior (lluvia, polvo, radiación solar, intrusión, etc.) desde el momento en que abandonan la nave de fabricación y hasta que acaba su instalación en obra. Para ello se recurre al sistema que actualmente utiliza la propia industria de la construcción modular, que consiste en un recubrimiento temporal de la cara abierta mediante una lona o una cubierta flexible, similar a las que emplean los camiones de laterales abiertos para carga y descarga (denominados coloquialmente en el sector como camiones-lona). Este cerramiento provisorio es recuperable y teniendo en cuenta que, de acuerdo con el planteamiento del estudio, todos los módulos tienen las mismas dimensiones y serán transportados varias veces a lo largo de su vida útil, debe ser considerado como un material más dentro del sistema constructivo.

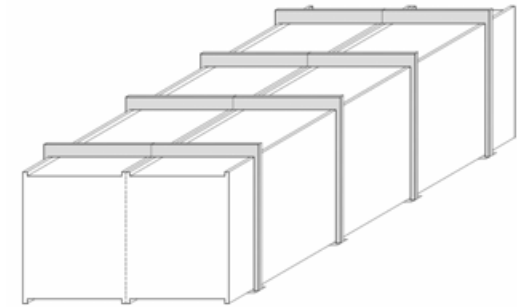
El segundo punto a tener en cuenta cuando el volumen habitable es resuelto con más de una unidad modular es el tratamiento de las juntas, especialmente en lo que respecta a las fijaciones mecánicas, a la estanqueidad y a los acabados interiores. Respecto de las fijaciones mecánicas, se realizarán mediante sistemas autoencajables atornillados (similares a los utilizados en las plataformas e carga de contenedores) que facilitan la puesta en obra y el correcto posicionado de forma automática. Por lo que hace a la estanqueidad, la unión reversible contará con materiales elásticos que la asegurarán. En el caso de la cubierta hay que destacar que el cerramiento de chapa de aluminio es independiente de los módulos, es decir que se dispone pasando por sobre todas las juntas. Respecto de los acabados interiores y a efectos de facilitar la desconstrucción, la junta será expuesta en forma similar a como se aprecia en la fotografías y detalle constructivo expuestos anteriormente.

La configuración interior de la nueva célula es similar a la ya considerada y, de hecho, sus dimensiones son muy próximas a las del módulo de hormigón armado estudiado en el capítulo anterior (4,5 x 11 m) que se comercializa en España. De tal forma ha sido considerado innecesario realizar una redistribución interior o un redimensionado del espacio del baño, de la profundidad de los pasillos de acceso o de las terrazas, así como tampoco se efectúan cambios en el armario de cocina y equipamiento que se dispone sobre una de las paredes largas. En consecuencia, la configuración del edificio se mantiene con las mismas características tenidas en cuenta en el análisis comparativo realizado sobre los sistemas constructivos convencional y modulares.

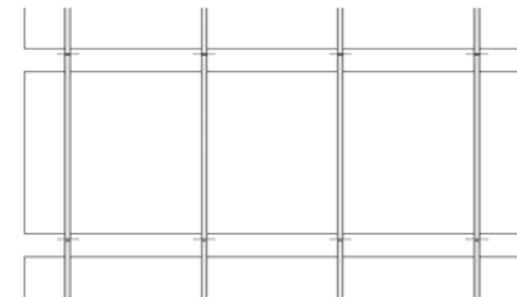
8.3 Análisis ambiental y de cierre de ciclo

Se realizará un análisis de ciclo de vida resumido sobre el edificio de estudio definido en el capítulo anterior, materializado con el sistema constructivo modular optimizado y teniendo en cuenta la caracterización de cada fase de su vida útil. Los indicadores son: peso de los materiales, consumo de energía, emisiones de CO₂, consumo de agua, producción de residuos sólidos, intensidad material MIPS, toxicidad ambiental y toxicidad humana. El trabajo a realizar, de acuerdo con las características de cada fase, es el siguiente.

- Fase 1 Extracción y fabricación de materiales: Determinación de los materiales empleados y a partir de ello de su peso, emisiones de CO₂ asociadas, material reciclado y material reciclable. Redefinición de los coeficientes de paso para determinar los impactos ambientales de los materiales renovables y reciclados por unidad de peso según diversas fuentes [Hammond, Jones 2007], [Hegger et al. 2006], [ITeC BEDEC 2006], [Häkkinen et al. 1999].
- Fase 2 Transporte: Determinación de las distancias a recorrer y de los medios a emplear en el caso supuesto y, a partir de ellas, cálculo de la energía invertida y las emisiones CO₂ asociadas.
- Fase 3 Construcción: Determinación de los equipos mecánicos a utilizar (grúas y otras máquinas herramienta) y a partir de ello cálculo de la energía invertida y las emisiones CO₂ asociadas, así como de los residuos producidos en la fábrica modular y en el emplazamiento de la obra.
- Fase 4 Uso: Determinación de la modalidad de uso, de los equipos asociados y del rendimiento de los mismos en los usos de climatización y agua caliente sanitaria y, a partir de ello, cálculo de la energía y las emisiones CO₂ asociadas durante un lapso de tiempo de 50 años.
- Fase 5 Mantenimiento: Determinación de los materiales empleados durante la vida útil del edificio (50 años) y a partir de ello establecer su peso, emisiones de CO₂ asociadas, material reciclado y material reciclable.
- Fase 6 Desconstrucción: Determinación de la maquinaria a emplear así como de su tiempo de uso para determinar la energía, las emisiones de CO₂ asociadas y los volúmenes de residuos sólidos producidos en el emplazamiento de la obra y en la fábrica modular.
- Resumen del ciclo de vida: Sumatoria de los datos obtenidos en cada indicador y fase para determinar los totales de la vida útil, así como comparación relativa entre fases.



Axonométrica de una unidad de vivienda formada por dos módulos apareados. Los cuatro pórticos de apoyo reciben las cargas de la planta superior y la transmiten a la inferior.



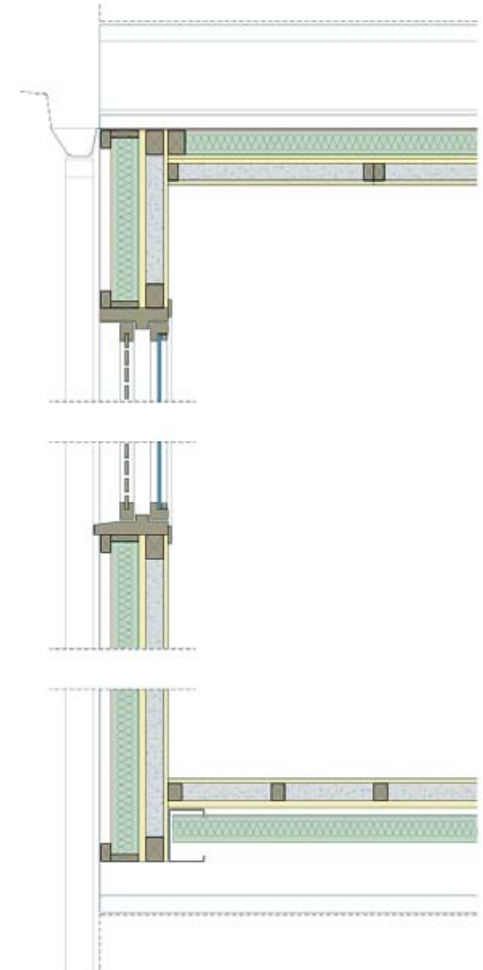
Elevación lateral mostrando el apilamiento de pórticos. Los pilares tubulares de acero descargan finalmente sobre muros de cimentación formados por gaviones.

- Comparación con otros sistemas analizados: Contraste de los resultados totales y por fase del sistema constructivo modular optimizado respecto de los sistemas analizados en el capítulo anterior (convencional, hormigón armado, acero y madera).
- Consideraciones sobre el cierre de los ciclos materiales: Determinación de los avances alcanzados respecto de la optimización del uso de los materiales, la reducción de los residuos y el aumento de la reutilización y el reciclaje.

Nota: las tablas y gráficos que siguen están elaboradas a partir de esta investigación.

Fases e indicadores	Extracción y fabricación	Transporte a obra	Construcción o montaje	Uso y mantenimiento	Derribo y residuos
01. Peso de los materiales					
02. Consumo de energía	Banco PR/PCT y otras fuentes, programa TCQ 2000, información de los fabricantes y cálculos propios		Banco PR/PCT, programa TCQ 2000 y cálculos propios	En uso: programas LIDER y Ecotect. Mantenimiento: cálculos propios	Cálculos propios
03. Emisiones de CO ₂		Cálculos propios de combustible según procedencia, peso y kilometraje.			
04. Toxicidad ambiental	No hay información disponible sobre materiales reciclados y algunos naturales	Conversión a energía, emisiones y toxicidad	Conversión de la energía empleada a toxicidad ambiental y humana	No hay información disponible sobre materiales reciclados y algunos naturales	Conversión de la energía empleada a toxicidad ambiental y humana
05. Toxicidad humana					
06. Recursos abióticos y bióticos	No hay información disponible sobre materiales reciclados y algunos naturales			No hay información disponible sobre materiales reciclados y algunos naturales	
07. Recursos, agua					
08. Residuos construcción y derribo			Banco PR/PCT, programa TCQ 2000 y cálculos propios		Banco PR/PCT, programa TCQ 2000, programa LIFE y estimaciones propias
09. Material reciclado	Banco PR/PCT, programa TCQ 2000, información de los fabricantes y cálculos propios			Banco PR/PCT, programa TCQ 2000, información de los fabricantes y cálculos propios	Banco PR/PCT, programa TCQ 2000, información de los fabricantes y cálculos propios
10. Material reciclable					

Sistema modular optimizado, sección longitudinal



La secuencia de capas de materiales, de dentro hacia fuera, es tablero perforado de madera aglomerada (19 mm), grava reciclada (50 mm), estructura de listones de madera (50 mm), tablero de madera aglomerada (22 mm), manto de lana de roca (40 a 120 mm según la zona climática), estructura de listones de madera (40-120 mm), membrana transpirable (120 g/m²), enrastrelado de madera (25 mm) y chapa de aluminio reciclado (0,08 mm).

Fase 1/6 Extracción y fabricación de materiales: repercusión de subsistemas

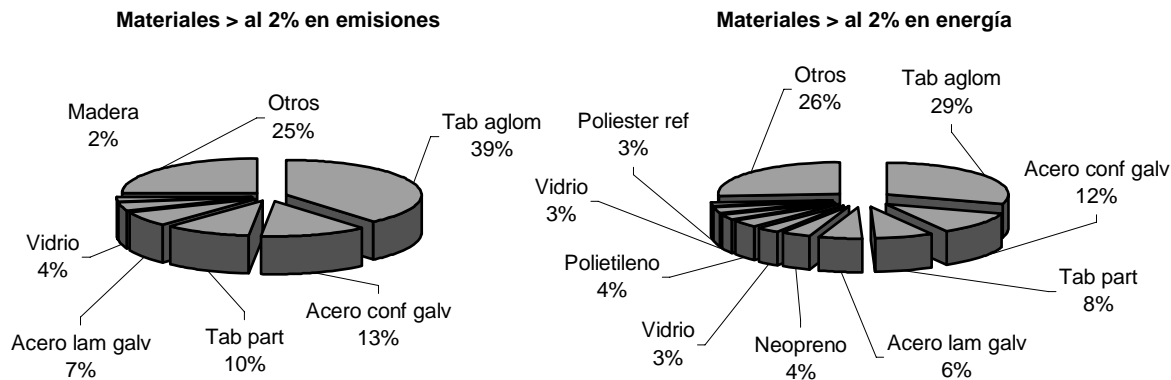
Subsistema	kg/m ²	%	MJ/m ²	%	kgCO ₂ /m ²	%
Replanteo y movimiento de tierras	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
Cimentaciones y muros de contención	109,74	23,94%	19,94	0,72%	1,61	0,94%
Espacios comunes	13,11	2,86%	140,75	5,06%	8	4,69%
Cubierta módulo y terrazas	0,65	0,14%	9,08	0,33%	0,54	0,32%
Fachadas laterales	0,25	0,05%	1,51	0,05%	0,091	0,05%
Estructura módulo	242,02	52,81%	1.519,08	54,61%	85,84	50,31%
Fachada acceso módulo	16,50	3,60%	120,45	4,33%	7,46	4,37%
Fachada terraza módulo	16,83	3,67%	140,26	5,04%	8,61	5,05%
Mobiliario módulo	17,71	3,86%	257,86	9,27%	13,3	7,80%
Baño módulo	7,86	1,72%	48,96	1,76%	2,68	1,57%
Terrazas módulo	8,33	1,82%	90,77	3,26%	5,16	3,02%
Aparatos de elevación	0,58	0,13%	13,15	0,47%	0,9	0,53%
Saneamiento, aguas grises, pluviales y lluvia	13,01	2,84%	97,76	3,51%	10,62	6,22%
Agua fría, caliente, gris y solar térmica	2,92	0,64%	108,27	3,89%	9,45	5,54%
Electricidad, iluminación y fotovoltaica	3,54	0,77%	95,75	3,44%	7,21	4,23%
Gas natural	0,01	0,00%	1,15	0,04%	0,1	0,06%
Climatización y ventilación	3,94	0,86%	87,47	3,14%	6,73	3,94%
Audio, datos y control	1,26	0,27%	26,41	0,95%	1,89	1,11%
Protección contra incendios	0,04	0,01%	3,19	0,11%	0,43	0,25%
Total	458,31	100%	2.781,81	100%	170,62	100%

Los indicadores de peso, energía y emisiones son muy inferiores a los que pueden encontrarse en otros estudios de edificios construidos con sistemas constructivos convencionales (entre 1500 y 2000 Kg/m², 6000 MJ/m² y 600 KgCO₂/m²), debido a la utilización intensiva de materiales naturales (madera, barnices, lana de oveja) y reciclados (acero, aluminio cobre). Respecto de la repercusión en energía y emisiones de CO₂ el capítulo Estructura del módulo representa algo más de la mitad en cada caso, debido a que reúne tanto la envolvente de paneles de madera como la estructura de perfiles de acero, partes fundamentales del edificio. Resulta notable que el siguiente capítulo, que implica entre el 7 y el 10% en ambos impactos, sea el del mobiliario fijo del módulo a causa de la utilización intensiva de tableros de madera revestida en melamina. Compartiendo el tercer lugar, con aproximadamente un 5% de la energía y las emisiones, se encuentran ambos capítulos dedicados a fachadas de los módulos.

Materiales > 1% en peso	kg/m ²	%
Árido	260,6	56,9%
Tablero aglomerado	71,7	15,6%
Madera	28,5	6,2%
Acero conformado galvanizado	27,5	6,0%
Tablero de partículas de madera	19,5	4,2%
Acero laminado galvanizado	14,2	3,1%
Vidrio	6,3	1,4%
	428,2	93,5%
Materiales > 1% en energía	MJ/m ²	%
Tablero aglomerado	1.075,4	38,7%
Acero conformado galvanizado	355,2	12,8%
Tablero de partículas de madera	291,8	10,5%
Acero laminado galvanizado	183,7	6,6%
Vidrio	100,3	3,6%
Madera	59,9	2,2%
PVC	59,3	2,1%
Acero galvanizado	51,6	1,9%
Neopreno	50,3	1,8%
Polipropileno	49,7	1,8%
Polietileno	43,9	1,6%
Lana de oveja	42,8	1,5%
Cobre	36,1	1,3%
Poliéster reforzado	35,2	1,3%
Barniz natural	30,5	1,1%
Aluminio	29,5	1,1%
	2.495,0	89,7%
Materiales > 1% en emisiones	kgCO ₂ /m ²	%
Tablero aglomerado	53,77	31,5%
Acero conformado galvanizado	20,59	12,1%
Tablero de partículas de madera	14,59	8,5%
Acero laminado galvanizado	10,65	6,2%
Neopreno	7,42	4,3%
Polietileno	6,48	3,8%
Vidrio	5,93	3,5%
Poliéster reforzado	5,19	3,0%
Lana de oveja	3,37	2,0%
Acero galvanizado	2,99	1,8%
Cobre	2,87	1,7%
ABS	2,69	1,6%
Polipropileno	2,45	1,4%
PVC	2,12	1,2%
Latón cromado	2,10	1,2%
Aluminio	1,91	1,1%
Árido	1,82	1,1%
Bronce	1,82	1,1%
Madera	1,71	1,0%
Latón	1,68	1,0%

Fase 1/6 Extracción y fabricación de materiales: reciclados y reciclables

Materiales > al 1% en Kg, MJ o CO₂		Forma habitual	Kg/m²	Reciclado %	Reciclable %
Árido	52% Estr. módulo, 43% Ciment. y muros	A granel y en losetas	260,56	260,56	100
Tablero aglomerado	93% Estr. módulo, 3% Fach. acc. módulo, 2,5% Fach. terr. mód.	Tableros	71,69	71,69	100
Madera	50% Estr. módulo, 13% Fach. acc. módulo, 14% Fach. terr. mód., 9% Esp. comunes	Lamas y listones	28,50	28,50	100
Acero conform. galvanizado	88% Estr. módulo, 8% Esp. comunes, 4% Terrazas mód.	Barras y perfiles	27,46	27,46	100
Tablero de part. de madera	84% Mobil. módulo, 7% Baño módulo, 5% Fach. terr. mód., 3% Fach. acc. módulo	Tableros	19,45	19,45	100
Acero laminado galvanizado	56% Esp. Comunes, 40% Terr. Módulo, 3% Cub. mód. y terr., 2% Mobil. módulo	Chapas y perfiles plegados	14,20	14,20	100
Vidrio	57% Fach. acc. módulo, 38% Fach. terr. mód., 5% Ag. fría/cal., gris y solar	Paneles cámara	6,30	1,26	20
Acero galvanizado	29% Estr. mód., 18% Fach. acc. mód., 18% Fach. terr. mód., 5% Ag. fría/cal., gris	Chapas y perfiles plegados	3,99	3,99	100
Lana de oveja	85% Estructura módulo, 7% Fach. acc. mód., 5% Fach. terr. mód.	Rollos y mantos	2,93	2,93	100
Barniz natural	70% Estr. módulo, 8% Fach. acc. módulo, 16% Fach. terr. mód.	Cajas de botes	1,52	1,22	80
Aluminio	53% Estr. módulo, 13% Esp. Com., 13% Cub. mód. y terr., 7% Climat. y vent.	Chapas, perfiles y accesorios	1,15	1,15	100
PVC	41% Ap. elevación, 25% Fach. acc. mód., 22% Fach. terr. mód., 6% Elec., ilu, fotov.	Ascensor, cajas de accesorios	0,84	0,42	50
Cobre	47% Ag. fría/cal., gris, 38% Climat. y vent., 10% Audio, datos, cont., 4% Elec., ilu,	Tubos, accesorios y cables	0,72	0,65	90
Poliéster reforzado	92% Sanem., aguas grises y pluv., 4% Elec, ilu, fotov.	Depósitos de gran volumen	0,65	0,33	50
Polipropileno	53% Ag. fría/cal., gris, 39% Sanem., aguas grises y pluv., 4% Elec, ilu, fotov.	Tubos y accesorios	0,63	0,32	50
Poliétileno	60% Estructura módulo, 17% Sanem., aguas grises y pluv., 11% Ag. fría/cal.	Rollos, tubos y accesorios	0,43	0,22	50
Neopreno	93% Estr. módulo, 6% Ciment. y muros	Láminas y rollos	0,42	0,21	50
Bronce	80% Agua fría, caliente, gris y solar térmica, 20% Climat. y vent.	Tubos y cajas de accesorios	0,40	0,20	50
ABS	94% Elec., ilu., fotov., 6% Audio, datos y control	Cajas de cables y accesorios	0,18	0,09	50
Latón cromado	100% Agua fría, caliente, gris y solar térmica	Cajas de grifería y accesorios	0,13	0,07	50
Latón	42% Climat. y vent., 36% Elec, ilu, fotov., 7% Agua fría, caliente, gris y solar térmica	Cajas de grifería y accesorios	0,11	0,05	50
Total			442,26	434,9	441,0
			96%	95%	96%



Respecto de los materiales de mayor impacto, considerando conjuntamente energía y emisiones de CO₂, estos son los distintos tipos de tableros aglomerados utilizados en los cerramientos de los módulos (40-60%) y las diversas clases de acero galvanizado empleados en las estructuras portantes (22-33%).

Otros materiales significativos son el vidrio en energía (4%) y el neopreno y el polietileno (4%) en emisiones.

El conjunto de materiales, escogidos por su buen desempeño en el reciclaje, alcanza valores muy altos tanto de contenido de reciclados (95%) como de reciclabilidad (96%), muy por encima de todos los sistemas analizados hasta el momento.

Fase 2/6 Transporte: materiales y módulos

Material	Forma predominante	Peso transp.	Densidad	Dens. corr. ^[4]	Vol. transp.	Dist. Corr. ^[1]	Cam./dist.	Consumo ^[6]		
		Tm	Tm/m ³	Tm/m ³	m ³	km	u/km	litros gasoil	%	
<i>Obra in situ</i>										
Árido (cimentaciones)	Gaviones	355,41	1,50	1,200	296,18	66	1518	455,40	7,2%	
Poliéster reforzado	Depósitos de gran volumen	1,36	1,35	0,135	10,10	168	504	151,20	2,4%	
<i>Fábrica</i>										
Árido (módulos)	A granel y en losetas	191,37	1,50	1,200	159,48		1316	394,71	6,2%	
Tablero aglomerado	Tableros	150,44	0,8	0,640	235,06		357	107,19	1,7%	
Madera	Lamas y listones	59,81	0,60	0,480	124,60		516	154,76	2,4%	
Acero conf. galvanizado	Barras y perfiles	57,61	7,85	5,495	10,48		533	159,88	2,5%	
Tablero de part. madera	Tableros	40,82	0,8	0,640	63,77		97	29,08	0,5%	
Acero lam. galvanizado	Chapas y perfiles plegados	29,80	7,85	5,495	5,42		276	82,69	1,3%	
Vidrio	Paneles cámara	13,22	2,6	1,300	10,17		164	49,08	0,8%	
Acero galvanizado	Chapas y perfiles plegados	8,37	7,85	5,495	1,52		77	23,24	0,4%	
Lana de oveja	Rollos y mantos	6,15	0,02	0,016	384,29		1164	349,32	5,5%	
Barniz natural	Cajas de botes	3,19	1,2	0,840	3,80		30	8,85	0,1%	
Aluminio	Chapas, perfiles, acc.	2,41	2,7	1,350	1,79		24	7,33	0,1%	
PVC	Ascensor, cajas de acc.	1,77	1,35	0,675	2,62		24	7,26	0,1%	
Cobre	Tubos, accesorios y cables	1,52	8,9	2,670	0,57		21	6,22	0,1%	
Polipropileno	Tubos y accesorios	1,32	0,94	0,658	2,01		51	15,20	0,2%	
Polietileno	Rollos, tubos y accesorios	0,90	0,91	0,637	1,42		34	10,07	0,2%	
Neopreno	Láminas y rollos	0,88	1,20	0,840	1,05		26	7,80	0,1%	
Bronce	Válvulas de agua	0,84	8,5	5,100	0,16		9	2,71	0,0%	
ABS	Cajas de cables y accesorios	0,38	1,35	0,945	0,40		4	1,22	0,0%	
Latón cromado	Cajas de grifería y accesorios	0,27	8,5	5,100	0,05		3	0,89	0,0%	
Latón	Cajas de grifería y accesorios	0,22	8,5	5,100	0,04		2	0,72	0,0%	
<i>Módulos</i>										
Unidades prefabricadas	Módulos galería + asc.	21,00					204	4284	1071,00	16,8%
Unidades prefabricadas	Módulos vivienda	64,00					204	13056	3264,00	51,3%
Resumen de indicadores								6359,82	100,0%	
Igasoil/m ² 3,03		Tox. amb. ECAKg/m ² 305,05								
MJ/m ² 130,92		Tox. hum. HCA+HCWkg/m ² 0,065								
KgCO ₂ /m ² 10,44										

En el transporte han sido tenidos en cuenta un par de aspectos fundamentales: a) que los materiales realizan tres trayectos, entre la fábrica de materiales y la fábrica modular, entre ésta y la obra y entre el almacén regional y la obra en el caso de la construcción in situ (cimentaciones) y b) que el origen de los materiales resulta muy difícil de determinar. Ha sido realizada una aproximación de cargas, volúmenes a transportar, orígenes, cantidad de envíos, porcentaje de carga de los camiones, etc., de la que se ofrece más información en los anexos. La mayor repercusión se encuentra en los módulos de vivienda (51%), seguidos por el resto de los módulos (17%) y materiales como la lana de oveja (6%) que por su gran volumen representa muchos viajes.

Fase 3/6: energía y emisiones

Construcción *in situ*

Excavaciones y cimentaciones

Excavación de zanjas y pozos en terreno compacto. Carga y transporte a vertedero ubicado entre 10 y 15km ^[1]
 Cimentaciones. Base de hormigón armado ascensor, muros de gaviones, solera ^[1]

	Energía	Emisiones
	<i>MJ_{gasoil}</i>	<i>KgCO₂_{gasoil}</i>
Excavación de zanjas y pozos en terreno compacto. Carga y transporte a vertedero ubicado entre 10 y 15km ^[1]	9.013,28	718,56
Cimentaciones. Base de hormigón armado ascensor, muros de gaviones, solera ^[1]	6.306,19	502,74

Montaje módulos

Izado y posicionamiento módulos vivienda

Camión grúa de 8 t de carga, 12 m de alcance vertical, 9 m de alcance horizontal y 25 kNm de momento de elevación. 1.217,24MJ/h y 317,94KgCO₂/h ^[3]

Módulos	Peso mód.	Sup. mód.	Peso mód.	Tiempo grúa		Energía	Emisiones
<i>u</i>	<i>kg/m²</i>	<i>m²</i>	<i>Tm</i>	<i>h/módulo</i>	<i>h totales</i>	<i>MJ_{gasoil}</i>	<i>KgCO₂_{gasoil}</i>
32	319,38	22,45	7,2	0,25	8	4868,96	388,16

Izado y posicionamiento módulos galería/ascensor

Camión grúa de 5 t de carga, 12 m de alcance vertical, 9 m de alcance horizontal y 25 kNm de momento de elevación. 1.217,24MJ/h y 317,94KgCO₂/h ^[3]

Módulos	Peso mód.	Sup. mód.	Peso mód.	Tiempo grúa		Energía	Emisiones
<i>u</i>	<i>kg/m²</i>	<i>m²</i>	<i>Tm</i>	<i>h/módulo</i>	<i>h totales</i>	<i>MJ_{gasoil}</i>	<i>KgCO₂_{gasoil}</i>
5	35	21,9	0,8	0,2	1	608,62	48,52
8	35	23,1	0,8	0,2	1,6	973,79	77,63
8	35	19,14	0,7	0,2	1,6	973,79	77,63

^[1] Según mediciones de presupuesto y cálculos con el programa TCQ 2000 y el Banco PR/PCT del ITeC

^[3] Valores extraídos de la partida C1502221 del Banco PR/PCT del ITeC

Total	22744,63	1813,25
Total/m²	10,84	0,86
Tox. amb.	25,25	<i>ECAKg/m²</i>
Tox. hum.	0,005	<i>HCA+HCWkg/m²</i>



Camiones grúa izando módulos de medidas similares a las consideradas (2,44 x 9,00m)

El cómputo de energía y emisiones derivadas de la maquinaria de obra es producido por la combustión en los motores de las grúas, camiones, excavadoras y otros equipos.

La aportación de energía manual no se tiene en cuenta debido a que no resulta sencillo determinar la parte relacionada sólo con el trabajo, de aquella necesaria para el resto de las actividades de los operarios, así como a su escasa repercusión frente a la maquinaria.

El gasto energético de mayor importancia es la excavación y el transporte de tierras al vertedero (40%) seguido por la ejecución de cimentaciones de gaviones y una base de hormigón armado (27%).

El resto del gasto energético, una tercera parte del total, se reparte entre el izado de los módulos de vivienda, galerías y torreta del ascensor.

Fase 3/6 Construcción: residuos in situ

	Pétr.	Yeso	Pap/cart	Plást.	Mad.	Met.	Esp.	Total	%
Totales en Kg	0,00	0,00	0,00	0,00	1,55	1,98	0,00	3,53	100,00%
							Total en kg/m²	0,002	
<i>% de reciclado buena práctica</i>	75	0	90	90	90	90	0		
Material reciclado	0,000	0,000	0,001	0,000	1,395	1,778	0,000	3,173	89,94%
							Kg/m²	0,002	
Residuos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,155	0,198	0,002	0,355	10,06%
							Kg/m²	0,000	

Fase 3/6 Construcción: residuos en fábrica modular

Fracción	Sobrantes y embalajes		Reutilización		Reciclaje		Vertido	
	kg/m ²	%	kg/m ²	%	kg/m ²	%	kg/m ²	%
Pétreos	,,,							
Plásticos	0,634	6,14%			0,634			
Madera	3,801	36,82%			3,801			
Metales	0,791	7,66%			0,791			
Otros	5,098	49,38%	2,542		1,415		1,142	
	10,32	100,00%	2,54	24,62%	6,64	64,32%	1,14	11,06%
Reutilizado	9,18	88,94%						
Peso edificio	458,3	100,00%						
Residuos	1,14	0,25%						

Construction assistée par ordinateur ou pas, l'atelier est le meilleur endroit pour construire. Et, tant qu'à faire, préparer des cellules tridimensionnelles.



Fabrication d'une unité modulaire SU-SI chez le constructeur Michael Kaufmann photo : J. Kaufmann Architektur
Fabricación de módulos SU-SI con predominio de madera (Kaufmann)

Los cálculos de residuos generados durante el proceso de fabricación de módulos de galerías y viviendas se basan en los estudios realizados por la organización inglesa WRAP Waste & Resources Action Programme (www.wrap.org.uk), especialmente en los documentos WAS 003-003: Offsite Construction Case Study / Waste Reduction Potential of Offsite Volumetric Construction [WRAP 2007-4] y WAS 003-003: Offsite Construction Case Study / Waste Minimisation through Offsite Timber Frame Construction [WRAP 2007-3] así como en estimaciones propias en base a consultas realizadas a fabricantes. El árido que se utiliza para inercia térmica, por ser a granel, no ha sido tenido en cuenta en el cálculo de residuos. En el caso de cables y embalajes se ha tenido en cuenta un porcentaje de reciclaje del 60%. Los residuos de construcción in situ, 0,0002 kg/m² y de fabricación de módulos 1,14 kg/m² suman 1,1402 kg/m², cifra que en comparación con los estándares de obras convencionales resulta muy baja. El alto porcentaje de reciclado (casi el 90%) que se alcanza tanto en la construcción in situ, donde intervienen pocos materiales, como en la fábrica modular lo hace posible.

Fase 4/6 Uso: energía y emisiones a 50 años

Uso	Demanda		Dem. CTE ^[7]	Consumo ^[8]		Superficie		Usuarios ^[9]	Vida útil ^[10]	Cons. vida útil		
	MJ/m ² /año	%	est/ref en %	MJ/m ² /año	%	KgCO ₂ /m ² /año	%	31u x 40m ²	3pers. x 31u	años	MJ/m ²	KgCO ₂ /m ²
Calefacción ^[1]	151,52	44,7%	84%	62,61	47,0%	11,3	46,8%	1392	93	50	3130,63	564,38
Refrigeración ^[2]	32,11	9,5%	80%	13,27	10,0%	2,4	9,9%	1392	93	50	663,47	119,61
Agua cal. sanit. ^{[3][12]}	76,49	22,6%	...	9,48	7,1%	1,7	7,1%	1392	93	50	474,13	85,47
Iluminación ^{[4][12]}	6,16	1,8%	...	6,16	4,6%	1,1	4,6%	1392	93	50	307,76	55,48
Cocina ^{[5][12]}	34,87	10,3%	...	34,87	26,2%	6,3	26,1%	1392	93	50	1743,50	314,31
Electrodomésticos ^{[6][12]}	37,98	11,2%	...	37,98	28,5%	6,8	28,4%	1392	93	50	1898,87	342,32
Captación fotovoltaica ^[7]				-31,04		5,5	22,9%	1392	93	50	-1551,97	-275,91
Total	339,13	100,0%		133,33	123,3%	24,1	145,8%			(final)	6666,39	1205,68
Climatizac. + ACS	260,13			54,33	(final)	9,9				(final)	2716,26	493,56
Climatizac. + ACS				141,25	(primaria)					(primaria)	7062,27	493,56
	Tox. amb.	8230	ECA kg/m ²			Tox. hum.	7,334	HCA+HCW kg/m ²				

[1] Calculada para el edificio de estudio con el programa LIDER (CTE-DBHE1) y contrastada con el programa Ecotect, edificio en zona climática C2 Gerona

[2] Calculada para el edificio de estudio con el programa LIDER (CTE-DBHE1) y contrastada con el programa Ecotect, edificio en zona climática C2 Gerona

[3] Valor estándar de demanda calculado en base a las exigencias normativas estatal y autonómica (CTE-DBHE4 y DE) suponiendo una ocupación de tres personas por vivienda. En el consumo se considera que, de acuerdo a las exigencias de las normativas, el 70% de la energía es aportada por fuentes solares.

[4] Demanda/consumo de electrodomésticos reducida sobre valores de referencia elaborados por ICAEN en 2000, [Mañá et al. 2003] por utilización de fuentes de luz de bajo consumo.

[5] Demanda/consumo en hogares según valores de referencia elaborados por ICAEN en 2000 [Mañá et al. 2003].

[6] Demanda de electrodomésticos reducida respecto de los valores de referencia elaborados por ICAEN en 2000 [Mañá et al. 2003], utilización de lavadoras y lavavajillas bitérmicas.

[7] Comparación de la demanda del edificio de estudio respecto del de referencia (o de cumplimiento normativo) definido por el programa LIDER (CTE-DBHE1)

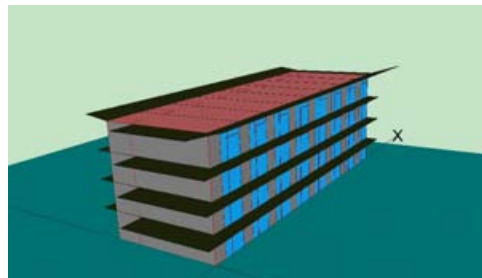
[8] Teniendo en cuenta un sistema de bomba de calor tierra-aire que se emplea en los usos de calefacción, agua caliente sanitaria y refrigeración con un COP de 2,42 (Estudio de reducción de emisiones de CO₂ en el ciclo de vida de un conjunto de viviendas en Tossa de Mar [SaAS et al. 2007]. Para la conversión de la energía a CO₂ ha sido utilizado el coeficiente de paso que emplea el programa CALENER GT elaborados por el IDAE de 0,649 KgCO₂/kWh en el caso de la electricidad.

[9] El decreto de mínimos de habitabilidad de Cataluña fija una superficie mínima de 10 m²/persona. En este caso han sido consideradas 3 personas por vivienda (14,96 m²/persona).

[10] 50 años es un período de tiempo usual en análisis de ciclo de vida de edificios, aunque en algunos casos se suele utilizar 60 y hasta 75 años.

[11] Suministro eléctrico de la instalación de 80m² contando un rendimiento anual de 150kWh/m².

[12] Estos valores se han reducido en un 17% para representar una situación de buena práctica (concurso La comunidad ahorra, Centro cultural la casa encendida, Madrid, 2006).



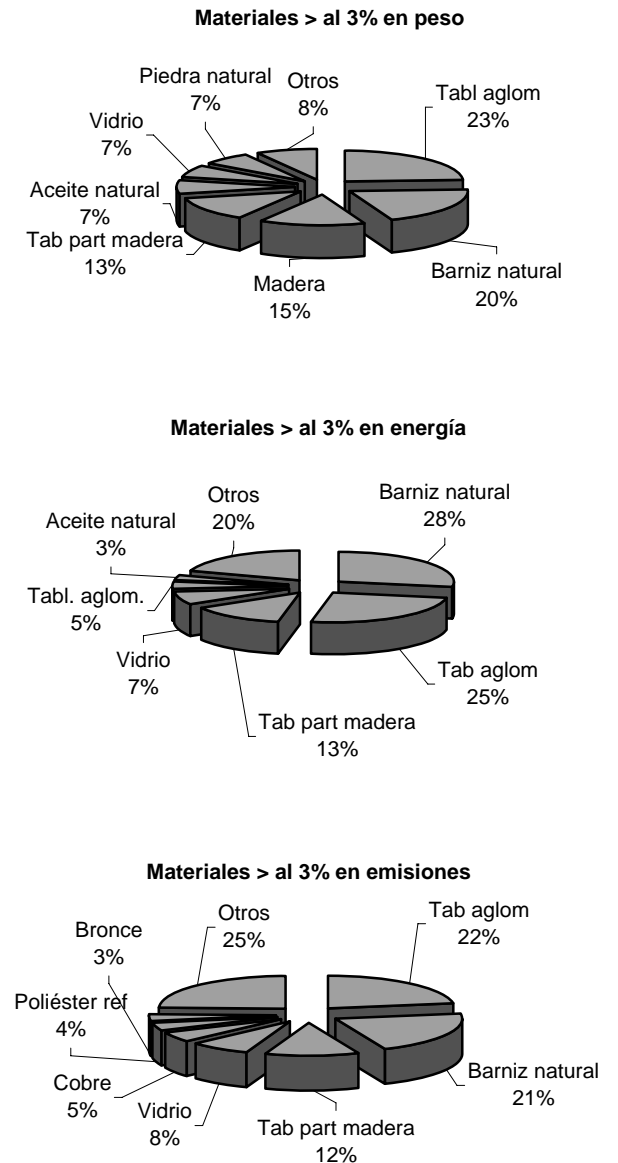
Edificio de estudio simulado con el programa LIDER.

Las relaciones proporcionales de demanda entre los distintos usos energéticos del edificio, cuya localización se supone en zona C2 (Banyoles) no se alejan de las medias del IDAE para toda España. Otra simulación realizada en zona B4 (Sevilla) ha dado como resultado una reducción total de la demanda del un 15%, así como variaciones relativas de la refrigeración y la calefacción, que pasan del 85% al 29% y del 18% al 54% respectivamente. La importante reducción de consumo que se aprecia en la energía final, debido a que la fuente es eléctrica la energía primaria es muy superior (ya que el coeficiente de paso empleado es 2,6). Este incremento se nota también en los valores de toxicidad humana y toxicidad ambiental que son superiores a los registrados en los casos del capítulo anterior, donde predominaba el gas natural.

Fase 5/6 Mantenimiento: repercusión por subsistemas a 50 años

Subsistema	Peso		Energía		Emisiones	
	kg/m ²	%	MJ/m ²	%	KgCO ₂ /m ²	%
Espacios comunes	4,11	12,92%	14,81	3,24%	0,58	2,26%
Cubierta módulo y terrazas	0,08	0,25%	0,35	0,08%	0,01	0,05%
Fachadas laterales	0,08	0,24%	0,24	0,05%	0,01	0,05%
Estructura módulo	12,60	39,62%	211,50	46,31%	10,05	39,14%
Fachada acceso módulo	1,32	4,15%	23,27	5,10%	1,26	4,91%
Fachada terraza módulo	2,09	6,57%	37,61	8,24%	1,96	7,63%
Mobiliario módulo	4,35	13,68%	63,37	13,88%	3,26	12,70%
Baño módulo	2,33	7,33%	6,08	1,33%	0,34	1,32%
Terrazas módulo	2,32	7,29%	8,23	1,80%	0,32	1,25%
Aparatos de elevación	0,20	0,63%	4,60	1,01%	0,32	1,25%
Saneamiento, aguas grises, pluviales y de lluvia	0,29	0,91%	10,43	2,28%	1,40	5,45%
Agua fría, caliente, gris y solar térmica	0,88	2,77%	32,72	7,16%	2,92	11,37%
Electricidad, iluminación y fotovoltaica	0,41	1,29%	16,60	3,64%	1,20	4,67%
Gas natural	0,01	0,02%	0,75	0,16%	0,07	0,26%
Climatización y ventilación	0,71	2,23%	24,34	5,33%	1,83	7,13%
Audio, datos y control	0,03	0,10%	1,77	0,39%	0,14	0,55%
	31,80	97,66%	456,67	94,28%	25,67	100,00%

El cálculo del consumo de materiales ha sido realizado teniendo en cuenta una vida útil de 50 años y los criterios técnicos establecidos en las Fichas Técnicas de Mantenimiento del ITeC, en sus valores medios. Para obtener los valores de peso, energía y emisiones han sido utilizados el banco PR/PCT y el programa TCQ 2000. La intensidad material y la toxicidad no han sido calculadas debido a que no se dispone de valores para un gran número de materiales, tanto reciclados (aceros galvanizados y aluminios) como naturales (barnices, lana de roca, aceites). El capítulo que concentra el impacto ambiental del mantenimiento, en energía y emisiones de CO₂ es Estructura módulo (40-46%). En segundo lugar se encuentran Mobiliario del módulo (13-14%) e Instalaciones de agua fría, caliente, gris y solar térmica (7-11%). Si se mira a través de la óptica de los materiales el barniz de los revestimientos carpinterías significan hasta un 30% de los mismos impactos y materiales que no suelen tenerse en cuenta como cobre, bronce o poliéster, alcanzan juntos hasta el 12%.



Fase 6/6 Desconstrucción: energía, emisiones y residuos

Desconstrucción	Módulos	Peso mód.	Sup. mód.	Peso mód.	Tiempo grúa		Energía	Emisiones
<i>Desmontaje módulos galerías y vivienda</i>	u	kg/m ²	m ²	Tm	h/módulo	h totales	MJ _{gasoil}	KgCO ₂ _{gasoil}
Camión grúa de 5 t de carga, 12 m de alcance vertical ^[1]	22	45	85,2	3,8	0,6	4,4	2677,93	213,49
Camión grúa de 5 t de carga, 12 m de alcance vertical ^[1]	64	319,4	22,4	7,2	0,25	16	12075,04	962,65
Demolición in situ				Volumen	Energía	Emisiones		
<i>Demolición estructura del ascensor</i>				m ³	MJ _{electricidad}	MJ _{gasoil}	KgCO ₂ _{electricidad}	KgCO ₂ _{gasoil}
Carga y transporte de residuos a centro de reciclaje ^[2]				120,85		17490,62		1394,39
Suministro de tierra seleccionada de aportación ^[3]				120,85		31.723,13		2.529,04
Pala cargadora mediana sobre neumáticos, de 117 kW ^[4]				120,85		2.868,54		228,69
Totales				Energía		Emisiones		
					MJ _{electricidad}	MJ _{gasoil}	KgCO ₂ _{electricidad}	KgCO ₂ _{gasoil}
Subtotales					66835,25		5328,25	
					Energía	Emisiones	Tox. amb.	Tox. human.
					MJ	KgCO ₂	ECA Kg/m ²	HCA+HCW kg/m ²
Total m²					31,85	2,54	91,17	0,020

[1] Valores partida C1502221 del Banco PR/PCT del ITeC
 [2] Valores partida E211U030 del Banco PR/PCT del ITeC
 [3] Valores partida E2A11000 del Banco PR/PCT del ITeC
 [4] Valores partida C1311120 ITeC y estimaciones propias

Obra in situ

Grupos de residuos ^[2]	Cantidades			Reciclaje ^[1]	
	kg/m ²	Tm	%	Tm	% obra
Pétreos	109,74	230,29	100	230,29	100,00%
Yeso	0,00	0,00	0	0,00	0,00%
Plásticos	0,00	0,00	80	0,00	0,00%
Madera	0,00	0,00	100	0,00	0,00%
Especiales	0,00	0,00	0	0,00	0,00%
Metales	0,00	0,00	100	0,00	0,00%
Totales	109,74	230,29		230,29	100,00%
				109,74 Kg/m²	

Construcción modular

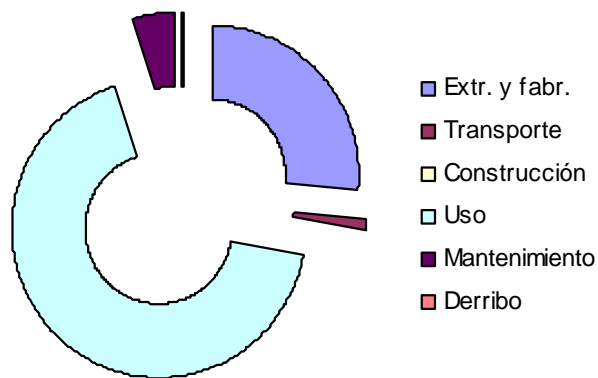
Grupos de residuos ^[3]	Cantidades			Reciclaje ^[1]	
	kg/m ²	Tm	%	Tm	% obra
Pétreos	150,82	316,50	100	316,50	43,27%
Vidrio	6,30	13,22	100	13,22	1,81%
Plásticos	3,15	6,62	80	5,29	0,72%
Madera	121,16	254,26	100	254,26	34,76%
Lana de oveja	2,93	6,15	100	6,15	0,84%
Metales	48,15	101,05	100	101,05	13,81%
Otros	16,05	33,68	50	16,84	2,30%
Totales	348,57	731,47		713,31	97,52%
				339,91 Kg/m²	

Total material reciclado (obra in situ + construcción modular en fábrica): 98%

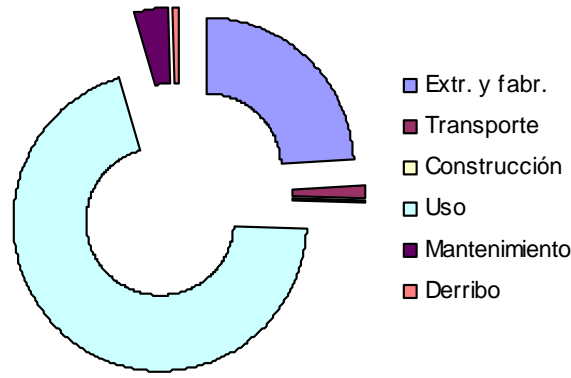
[1] Valoración del porcentaje de residuos de desconstrucción de obra in situ que efectivamente pueden reciclarse en una situación de buena práctica, según estimaciones propias. [2] Aunque pueda no ser el más frecuente, se considera un escenario de buena práctica de gestión de residuos de derribo de construcción in situ. Separación selectiva en 6 fracciones (se excluye papel y cartón) y porcentajes de reciclaje efectivo de: 100% para los áridos separables, 80% para los plásticos, 100% para las maderas libres de restos, 0% para los especiales (materiales peligrosos, contaminantes y pequeñas fracciones difíciles de valorizar) y 100% para los metales, entre los que predomina el acero cuyo reciclaje se encuentra muy extendido. [3] El escenario de gestión de residuos para los módulos de galerías parte de dos presupuestos: que ellos regresan a fábrica luego del período de vida útil y que allí son desconstruidos para ser reusados, rehabilitados o reciclados. Los porcentajes de reciclaje son: 100% para los áridos, la madera, la lana de roca y el vidrio (que pueden desmontarse y ser entregados a un reciclador sin materiales adheridos) así como los metales donde predomina el acero que resulta sencillo reciclar, 80% para los plásticos ya que en buena parte no se encuentran adheridos a otros elementos y, finalmente, 50 para otros por tratarse de pequeñas cantidades de muchos materiales.

Total fases, resumen del ciclo de vida

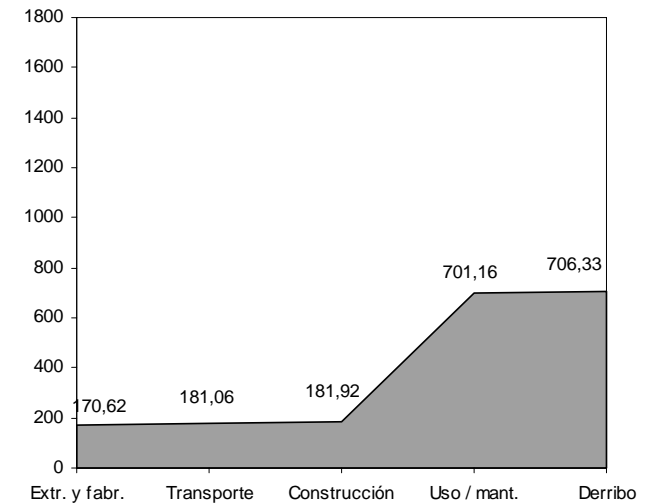
		Extracción y fabricación	Transporte	Construcción	Uso	Mantenimiento	Derribo	Total
Consumo de energía primaria	MJ/m ²	2781,81	130,92	10,84	7062,27	456,67	31,85	10474,36
		26,6%	1,2%	0,1%	67,4%	4,4%	0,3%	100,0%
Emisiones generadas	KgCO ₂ /m ²	170,62	10,44	0,86	493,56	25,67	5,18	706,33
		24,2%	1,5%	0,1%	69,9%	3,6%	0,7%	100,0%



Distribución del consumo de energía primaria a lo largo del ciclo de vida del edificio.



Distribución de las emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida del edificio.



Emisiones acumuladas de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de 50 años del edificio. Los intervalos entre fases no son representativos del tiempo transcurrido.

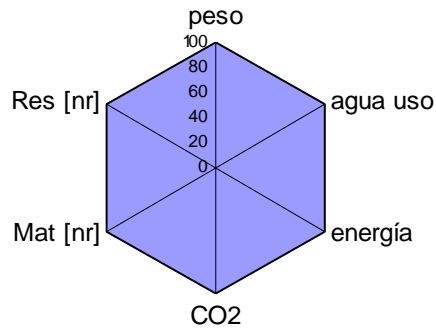
Aunque han sido determinados otros efectos, el cuadro del ciclo de vida presenta una síntesis representada por la energía y las emisiones de CO₂, por tratarse de indicadores de uso muy extendido en análisis de impacto ambiental.

Como sucede en la mayoría de los análisis de ciclo de vida de los edificios, las etapas de Extracción y fabricación de materiales y Uso del edificio concentran la mayor parte del impacto, hasta un 95% según los indicadores utilizados. En este caso la relación entre la fase de uso y la de extracción y fabricación de materiales es muy alta, casi 3 a 1, debido a que en la primera han sido sustituidos casi todos los materiales de alto impacto.

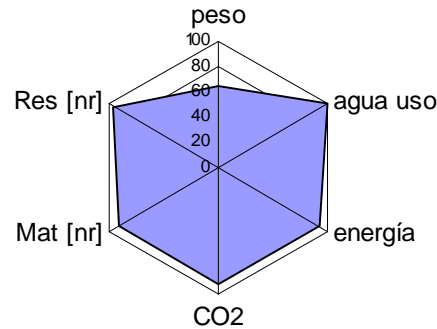
La proporción respecto del total es muy similar en el caso de la energía y en algo menos en el caso de las emisiones debido al predominio de la electricidad en calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria cuyo coeficiente de paso entre energía y CO₂ es más elevado que el de otras fuentes energéticas.

Comparación con otros sistemas analizados

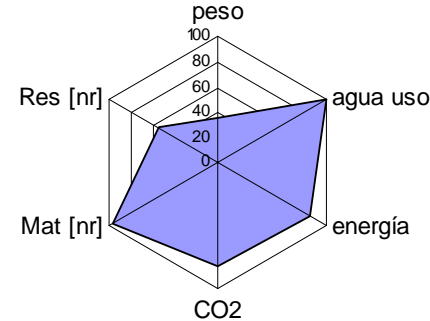
Sistema	Peso		Energía		Emisiones		Extr. y fabricac.		Construcción	Mantenimiento		Derribo	Agua de uso	
	kg/m ²	%	MJ/m ²	%	KgCO ₂ /m ²	%	Reciclado	Reciclaje	Reciclaje	Reciclado	Reciclaje	Reciclaje	l/m ²	%
Convencional (base de comparación)	1505,67	100%	20720,02	100%	1554,02	100%	1%	1%	8%	1%	1%	5%	210240,00	100%
Modular hormigón	972,59	65%	19155,15	92%	1444,41	93%	2%	2%	97%	10%	8%	24%	210240,00	100%
Modular madera	536,51	36%	17683,08	85%	1278,78	82%	3%	1%	95%	4%	1%	45%	210240,00	100%
Modular acero	431,66	29%	21142,81	102%	1614,71	104%	10%	10%	92%	16%	13%	36%	210240,00	100%
Optimizado	490,11	33%	10474,59	51%	699,06	45%	95%	96%	89%	86%	96%	98%	63072,00	30%



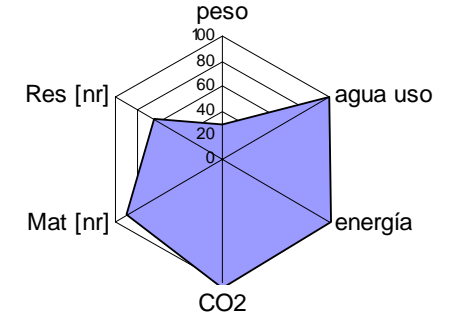
Convencional (base)



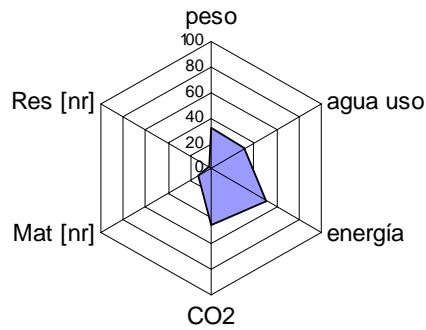
Modular hormigón



Modular madera



Modular acero



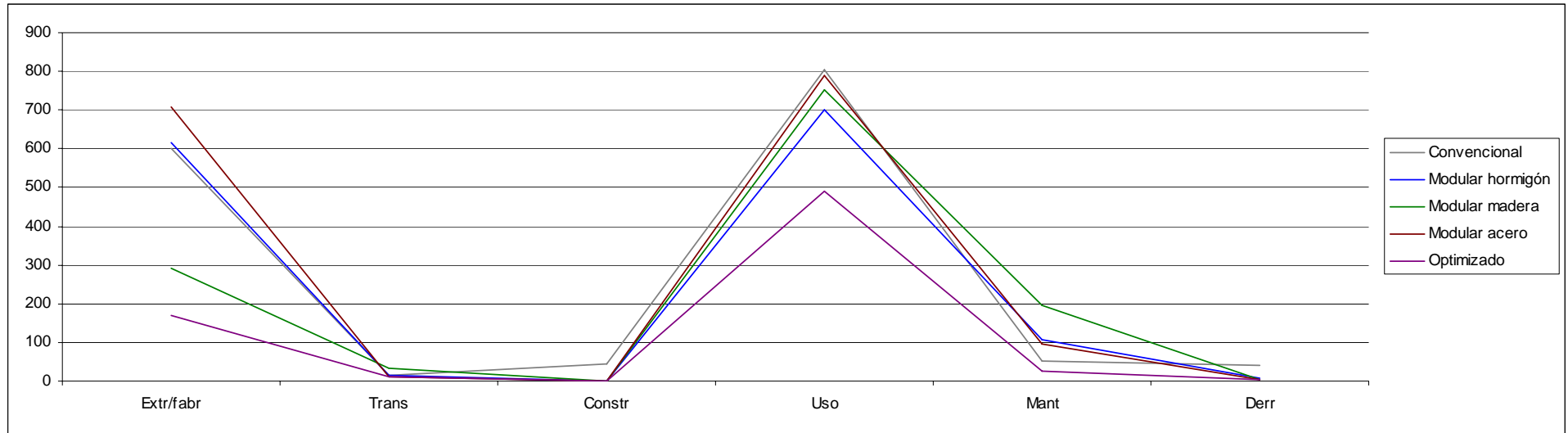
Modular optimizado

El sistema convencional representa la base de comparación para los otros sistemas, razón por la que presenta un valor de 100% en los seis indicadores. A partir de ello y mediante los valores obtenidos por el resto de los sistemas, los modulares de hormigón, madera, acero y optimizado es posible establecer una comparación común.

La silueta por lejos más pequeña y, por tanto, que menores impactos globales representa corresponde al optimizado, seguida por la madera, el hormigón y por último por el acero, con mayores valores en energía y emisiones aunque menores en cuanto a peso, residuos y materiales.

Respecto de los indicadores sobre residuos no reciclados [nr] y materiales no reciclados [nr], el sistema modular optimizado obtiene valores muy altos, más del 90%, a diferencia del resto de sistemas en los cuales no se superan tasas del 50%.

Consideraciones sobre el cierre de los ciclos materiales

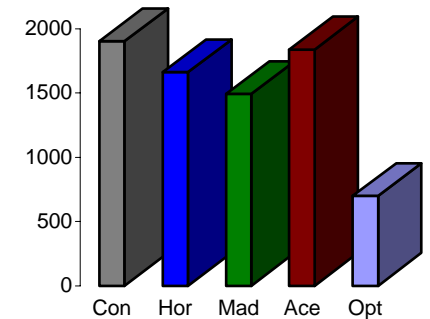


Emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida, en kg/m²

Mediante un indicador de indicadores, como las emisiones de CO₂, puede comprobarse que aunque existen grandes diferencias en algunas etapas, en el total del ciclo de vida todos los sistemas estándar tienden a igualarse debido a su diferente capacidad de respuesta frente a las demandas de cada fase.

El optimizado, a partir de las estrategias de reducción de impacto basadas esencialmente en la sustitución de materiales convencionales por reciclados y naturales, así como de reducción de la demanda de energía mediante el diseño de la envolvente y el aumento de la eficiencia energética mediante la utilización de equipos alternativos, disminuye sensiblemente el impacto de las etapas de extracción y fabricación y de uso.

Respecto del total acumulado los sistemas convencional y de acero se sitúan en un primer nivel, cercano a los 2000 kg/CO₂/m², ubicándose luego el de hormigón y la madera con algo más de 1700 y 1500 kg/CO₂/m² respectivamente. La diferencia significativa la produce en sistema optimizado, que acumula en su vida útil algo más de 700 kg/CO₂/m².



Edificios	KgCO ₂ /m ²	%
Convencional	1903	100%
Hormigón	1663	87%
Acero	1839	97%
Madera	1493	78%
Optimizado	699	37%

8.4 Conclusiones

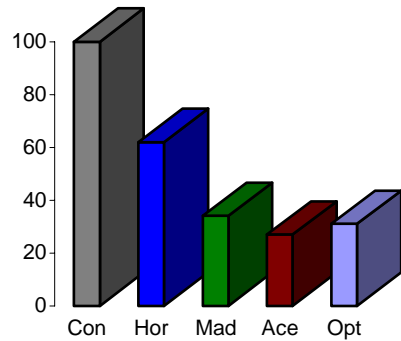
El estudio ambiental del sistema modular optimizado ha permitido detectar, entre otras cosas ya mencionadas, unos límites y problemas concretos en las mejoras que pueden alcanzarse.

En cuanto a los límites, es posible alcanzar una reducción sustantiva en casi todos los indicadores de impacto ambiental -del edificio modular optimizado respecto de las otras opciones estudiadas en el capítulo precedente- mediante los cambios introducidos en cada una de las fases. Esto ha implicado una disminución de un 50% o más en consumo de materiales, energía, emisiones de CO₂, residuos sólidos, etc. En cuanto a la reciclabilidad efectiva de los recursos empleados -la condición de cierre de ciclos materiales que este estudio se propuso llevar al límite máximo posible- las diferencias son aún mayores ya que el sistema optimizado alcanza valores de hasta el 95%.

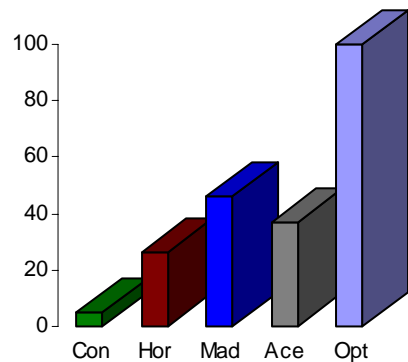
No obstante, profundizar aún más estas mejoras dentro de las restricciones que presentan las técnicas y productos disponibles en el mercado global actualmente -una condición que esta tesis se propuso respetar dado que pretende arribar a conclusiones aplicables en la realidad- no resulta sencillo. En el transcurso de esta investigación han sido alcanzados algunos límites fijados por las técnicas, los productos, o la información existente, que en principio imposibilitan ir más allá de los resultados alcanzados. O bien suponen disponer de materiales o mecanismos cuya complejidad o coste resultan desproporcionados para un proyecto como el que se ha estudiado.

Respecto de los problemas, debe tenerse en cuenta que muchas de las mejoras a introducir conllevan efectos negativos que impiden contabilizarlas simplemente como una disminución de los impactos considerados. La incorporación de instalaciones de intercambio geotérmico, de recogida de aguas de lluvia, de captación solar térmica y fotovoltaica, por ejemplo, actúan positivamente en la etapa de uso reduciendo el consumo de agua o disminuyendo el gasto energético al mismo tiempo que afectan negativamente al consumo de materiales de alto impacto ambiental y sus posibilidades de reciclaje durante las etapas de uso, mantenimiento y desconstrucción del edificio.

Algunas de las modificaciones estudiadas que inicialmente habían sido consideradas como una mejora, una vez puestas en medida y consideradas en la complejidad del ciclo de vida del edificio, acabaron teniendo una incidencia neutra e incluso negativa cuando todas las etapas fueron contabilizadas. Es el caso, por ejemplo, de la utilización de módulos de ancho estándar que significó emplear dos camiones para cada unidad de vivienda en lugar de uno de ancho especial y acompañado de vehículos escolta, contándose finalmente



Residuos generados durante el ciclo de vida (en porcentajes relativos, tomando como base 100 el sistema convencional)



Relación residuos reciclados / materiales empleados (en porcentajes absolutos)

(dentro de los condicionantes de las distancias que el caso planteaba) una mayor cantidad de energía.

Estas consideraciones sobre límites y problemas de las mejoras permiten elaborar algo así como una breve lista de obstáculos a superar que, siguiendo el orden de las etapas del estudio, se compone de los siguientes puntos.

- Extracción y fabricación de materiales: disponer de aceros, aluminios, etc., con mayor participación de energías renovables, eliminación de procesos tóxicos y reciclaje de recursos en sus procesos de fabricación.
- Transporte: aumentar la eficiencia del sistema (camiones de menor consumo o combustibles renovables, viajes de regreso a carga completa, etc.) y definir los radios de acción en que las fábricas modulares pueden ser eficientes (o cuando el impacto del transporte hace ineficiente al sistema).
- Construcción: desarrollar cimentaciones propias del sistema, adaptables a diferentes capacidades de carga de suelos, que sean recuperables y reciclables, así como utilizar grúas de menor consumo o impulsadas a energías renovables.
- Uso: estudiar mejoras de reducción de demanda en los sistemas constructivos, de acuerdo a cada clima, para controlar más estrictamente la infiltración, la ventilación controlada térmicamente, la ganancia solar selectiva, etc., así como también equipos e instalaciones de mayor eficiencia o reducción de impactos específicos como, por ejemplo, la toxicidad en el origen de la generación de la energía eléctrica que provoca el uso en las bombas de calor.
- Mantenimiento: disponer de tratamientos naturales de la madera que aumenten su durabilidad y/o disminuyan el impacto ambiental de cada aplicación.
- Desconstrucción: desarrollar productos de instalaciones que puedan ser descompuestos en materiales simples y reciclables.

Algunas de estas condicionantes escapan a las posibilidades de este estudio mientras que otras podrán ser consideradas en el capítulo que sigue, dedicado a la gestión industrial y comercial del sistema de módulos de alquiler. También allí tendrá lugar la verificación de algunos supuestos técnicos que, como los proveedores o recicladores de materiales resultan clave para asegurar las condiciones de cierre de ciclo del sistema considerado.



Edificios modulares ligeros. Sistema de gestión integrada (Corus). Fabricación, transporte, montaje, mantenimiento y desconstrucción.



Bibliografía:

- [ACS 2008] Col·legi d'aparelladors i arquitectes tècnics de Barcelona et al., *Agenda de la construcció sostenible* (base de datos on-line), Barcelona, España, consultas durante 2008
- [Ayunt. Madrid 2007] *Catálogo de productos de bajo impacto ambiental para el mantenimiento y rehabilitación de los edificios* (documento on line consultado en www.munimadrid.es en diciembre de 2007), Ayuntamiento de Madrid, España, 2007.
- [Hammond, Jones 2007], J. Hammond, C. Jones, *Inventory of Carbon & Energy (ICE)* (doc. electr.), University of Bath, Reino Unido, 2007.
- [Häkkinen et al. 1999] T. Häkkinen, P. Ahola, L. Vanhatalo, A. Merra, *Environmental Impact of Coated Exterior Wooden Cladding* (documento electrónico), Technology Development Centre (TEKES), Helsinki, Finlandia, 1999.
- [Hegger et al. 2006] M. Hegger, V. Auch-Schwelk, M. Fuchs, T. Rosenkranz, *Construction materials manual*, Birkhäuser edition Detail, Munich, Alemania, 2006, ISBN 3764375701.
- [Hegger et al. 2008], M. Hegger, M. Fuchs, T. Stark, M. Zeumer, *Energy Manual: Sustainable Architecture*, Birkhauser/Edition Detail, Basilea, Suiza, 2008.
- [IBO 2008] IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und ökologie, *Details for passive houses. Passivhausbauteilkatalog. A catalogue for ecologically rated constructions*, Viena, Austria 1999, ISBN 3-211-29763-4.
- [ITeC, COAC, UPC 1996] N. Casado et al., *La Enseñanza de la Arquitectura y el Medio Ambiente*. Programa Life, Colegio de Arquitectos, Instituto de Tecnología de la Construcción y Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 1996.
- [ITeC 1991] Equipo técnico del Àrea de construcció existent de IITeC, *Manteniment de l'edifici. Fitxes*, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, Barcelona, 1991, ISBN 8478530304.
- [ITeC BEDEC 2006] *Banco BEDEC PR/PCT* (versión 2006), ITeC, Barcelona, España.
- [Neila 2005] F.J. Neila, *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*, Editorial: Munilla-Lería, Madrid, España, ISBN: 8489150648.
- [Oliva 2001] Jean Pierre Oliva, *L'isolation ecologique*, Terre vivante, Francia ISBN 2904082905
- [Reinberg 2008] Georg Reinberg, *Reinberg: Ecological Architecture. Design - Planning - Realisation*, Springer, Viena, Austria, 2008, EAN 9783211327708.
- [SaAS et al. 2007], J. Sabaté, A. Cuchí, A. Sagrera, G. Wadel, F. López, A. Moreno, J. Vidal, S. Cantos, *Estudio de reducción de emisiones de CO₂ en un conjunto de 60 VPO* (doc. electr.), Sabaté associats Arquitectura i Sostenibilitat, Barcelona, España, 2007.
- [Staib 2008] G. Staib, A. Dörrhöfer, M. Rosenthal, *Components and systems. Modular building: design, construction, new technologies*. Birkhäuser-Detail, Berlin, 2008, ISBN 978-3-7643-8656-6.

[Serra et al. 2000] R. Serra y H. Coch, *Arquitectura y energía natural*, Edicions UPC, Barcelona, España, 1995, ISBN 8476535058.

[Wooley, Kimmins 2000] Tom Wooley, Sam Kimmins. *Green Building Handbook: A companion guide to building products and their impact on the environment* (volúmenes 1 y 2), Spoon press, Londres, Reino Unido, 2000, ISBN 0419253807 y 0419253807

[WRAP 2007] AMA research Ltd, *Choosing construction products* (catálogo), The waste & resources action programme WRAP, Oxon, Reino Unido, 2007.

[WRAP 2007-3] Waste & Resources Action Programme, *WAS 003-003: Offsite Construction Case Study, Waste Minimisation through Offsite Timber Frame Construction* (doc. electr.), Oxon, Reino Unido, 2007.

[WRAP 2007-4] Waste & Resources Action Programme, *WAS 003-003: Offsite Construction Case Study, Waste Reduction Potential of Offsite Volumetric Construction* (doc. electr.), Oxon, Reino Unido, 2007.

Notas:

¹ Instrucción Española Hormigón Estructural (EHE-08), puesta en vigencia por el Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio.

² La energía tiene un soporte material (excepto la solar directa, la eólica, o la fotovoltaica) por lo que forma un residuo: el cierre de los ciclos debe implicarlo y, por tanto, parte de la estrategia del cierre de ciclos consiste en el giro hacia las fuentes renovables.

³ Una consideración especial merecen los materiales de cambio de fase, como ciertas ceras que se funden o solidifican en temperaturas próximas a las de las bandas inferiores y superiores de confort (sobre los 18 °C y 24°C) absorbiendo o cediendo energía térmica del aire del entorno y, por tanto, regulando las subidas y bajadas de temperatura en un espacio confinado. Actualmente se dispone de ensayos experimentales documentados que permiten hacer una aproximación cuantitativa a la regulación de la temperatura interior y el ahorro energético de climatización que permiten estos materiales, e incluso existen productos de reciente puesta en comercialización como Micronal®PCM de BASF (microcápsulas de material acumulador de calor latente que es cedido o absorbido en el cambio de fase) para adicionar a los materiales de construcción o bien ya incorporadas en placas de yeso. No obstante, no ha resultado posible obtener información sobre factores tales como la procedencia de las materias primas, la energía y las emisiones de extracción y fabricación, la generación y el tratamiento de residuos a lo largo de su ciclo de vida, etc., planteándose a partir de ello dudas acerca de su evaluación ambiental global, razón por la que no han sido tenidos en cuenta en el sistema modular optimizado.

⁴ Según los estudios de flujos de materiales elaborados por la European Aluminium Association y presentados en su Recycling Brochure 2004 actualmente más del 50% del aluminio que ingresa al sistema industrial es de origen reciclado pre y post consumo. Adicionalmente y como se verá en el Capítulo 9, ciertas empresas ofrecen certificaciones de contenido reciclado para sus productos que alcanzan niveles superiores al 80%. La reducción de los impactos asociados (recursos abióticos y bióticos afectados, energía y emisiones de fabricación, residuos de la electrólisis, etc.) se reducen notablemente (para el caso del 100% de reciclaje diversos autores estiman una reducción de la energía y las emisiones de CO₂ del orden del 90%).

⁵ La normativa actual (Código Técnico de la Edificación, Documento Básico DB-SI: Seguridad en caso de incendio) respecto de protección al fuego en edificios residenciales prevé, para un edificio como el que se estudia aquí, una distancia máxima de 25m a las escaleras de evacuación, a contar desde la puerta de salida de cada unidad de vivienda, algo que se resuelve fácilmente con el doblado de la escalera (una por cada testero). Dado que la tipología escogida no incluía esta segunda escalera inicialmente, y a efectos de mantener al sistema modular optimizado en condiciones de ser comparado con los otros cuatro sistemas estudiados en el Capítulo 8, tampoco es tenida en cuenta en este capítulo.

La cuestión de la previsión del riesgo de incendio respecto de las exigencias normativas encuentra una segunda dificultad, que es la resistencia al fuego de una hora (RF60) en el material de revestimiento de muros, techo y suelo. No se ha encontrado una referencia comercial de un material renovable o completamente reciclado de que cumpla esta condición, razón por la que se asume que la madera de los tableros utilizados en estos usos cuenta con alguna protección natural (por ejemplo sales minerales) que no altera sus posibilidades de renovabilidad (a través de su compostaje y transformación en nutrientes) o su reciclabilidad (a partir de su triturado y conversión en fibras).

⁶ International Organization for Standardization u Organización Internacional para la Estandarización, que reúne institutos de normas nacionales de 157 países.

⁷ Entre otros sistemas fueron consideradas las cimentaciones autoperforantes y recuperables, que consisten en un tubo con una hélice en su extremo inferior realizado en acero. Mediante la ayuda de una máquina portátil esta cimentación es literalmente enroscada en el terreno actuando como cimentación exclusivamente por punta mediante la transmisión de cargas en profundidad al suelo a través de su hélice. De la misma manera, puede desenroscarse y ser recuperada. La profundidad, la cantidad piezas -llamadas Technopiece- y el diámetro de la hélice a emplear dependen del cálculo estructural de las cimentaciones, en relación con la carga a soportar y las características del subsuelo. La protección de la corrosión se produce por dos maneras, la galvanización del acero y la aplicación de otros materiales de propiedades electroquímicas. Consulta en línea, 02/09 en <http://www.technopieux.com>

⁸ La repercusión de iluminación, cocina y electrodomésticos, usos más relacionados con la actitud del usuario y menos con la habitabilidad del edificio, ya habían sido calculadas pero no tenidas en cuenta en el ciclo de vida.

⁹ Documento Básico HE4 del Código Técnico de la Edificación, Decreto de Ecoeficiencia de la Generalitat de Cataluña y ordenanzas municipales de energía solar.

¹⁰ Decreto de Ecoeficiencia de la Generalitat de Cataluña, en el caso de instalaciones con calentamiento a resistencia eléctrica en zona de red de gas.

¹¹ Se tomará como ejemplo la pauta de ahorro global de consumo energético alcanzado por las comunidades de vecinos que participaron en el concurso La comunidad ahorra organizado por la Casa encendida de Madrid en 2006, que fue del 16% y se obtuvo mediante la modificación de las pautas de uso y la sustitución de fuentes de luz y electrodomésticos por opciones de mercado de bajo consumo.

¹² Transporte especial por carretera es aquel que supone anchos de carga superiores a los 2,55m y/o sobresale en más de 2 m por delante y 3 m por detrás en vehículos de largo mayor a 5 m, según el Real Decreto 1428/2003, artículo 15.