

**LA SOSTENIBILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA
LA CONSTRUCCIÓN MODULAR LIGERA APLICADA A LA VIVIENDA**

TESIS DOCTORAL

Doctorando: Gerardo Wadel
Director de tesis: Jaume Avellaneda
Tutor de estudios y Tutor de tesis: Albert Cuchí

Programa de doctorado Ámbitos de Investigación en la Energía y el Medio ambiente
en la Arquitectura
Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1
Universidad Politécnica de Cataluña

JULIO DE 2009

A Liliana, Catalina y Amanda.

Por qué esta tesis

Siempre me atrajo ese momento en que la arquitectura pasa de inmaterial a material, cuando la maqueta o los planos dan paso a los sistemas técnicos que harán posible que sea habitable, que se sostenga y que perdure. Cuando comencé a andar como arquitecto tenía la sensación de que todo es posible, pero me duró poco, porque fui enterándome de que las cosas tienen un precio distinto del económico: el impacto ambiental. Por entonces tenía lugar la Cumbre de Río de 1992, que marcó un antes y después para quienes nos sentimos definitivamente atraídos por el reto que la sostenibilidad plantea a la sociedad en general y a la arquitectura en particular. Se renovaba a partir de esta nueva visión, al menos para mí, el cuestionamiento del sistema económico y social que nos hemos dado para vivir.

Cuando comencé a pensar en realizar un doctorado la idea borrosa que de forma intuitiva me dirigió hacia esta investigación consistía más o menos en lo siguiente: si la arquitectura tiene unos impactos ambientales relacionados con los materiales que consume y los residuos que genera -aún no sabía ni cuáles ni en qué magnitud- la clave para neutralizarlos debería estar en producirla con recursos que pudieran regenerarse y no contaminaran. Pensado esto en borrador desde mi país de origen, Argentina, la idea fuerza por entonces era que debía realizar una investigación sobre la vivienda construida con madera de bosques del noreste argentino que aseguraran su renovación. Cuando vuelvo la vista atrás me resulta curioso pensar que en aquellos momentos ya intuía que mi tema era encontrar la manera de construir, usar, mantener y desconstruir renovando siempre los recursos. El cierre del ciclo de los materiales en la edificación (ambición no me faltaba).

Con el tiempo y el aprendizaje comprendí que me había metido en un tema de gran complejidad, en el que me resultaba difícil definir mi investigación. La renovación podía producirse tanto en la biosfera como en la industria y me interesaba particularmente esta última, porque allí se procesa la gran mayoría de los recursos que como sociedad empleamos. Y yo quería intentar incidir en ella. En esas estaba cuando mi tutor de estudios Albert Cuchí puso en mis manos el libro *Mid-course correction* en el que Ray Anderson explica la estrategia de cierre de ciclos materiales que aplica a su empresa. Me animó a pensar que mi tesis debía buscar caminos en ese tema, pero subiendo de escala hasta el nivel de la edificación. Conversaciones posteriores con mi director de tesis Jaume Avellaneda me permitieron poner las cosas en blanco sobre negro: debía rescatar la experiencia de más de 100 años de construcción industrializada y acotar un tema tan extenso al uso de la vivienda, la escala del edificio, unos materiales en concreto y unos sistemas constructivos y de producción en particular. Lo que sigue... ya es la tesis.

Abstract

The condition of sustainability, from a physical point of view, is defined as the closure of the material cycle. This is reached in determined systems, in the absence of residual flows, and in which resources are constantly recycled. Such systems can encounter serious obstacles in the productive model that characterises the majority of contemporary industry. The productive model, born during the Industrial Revolution, can be summarised by the following lineal sequence: extraction>manufacture>residue. In contrast, this research focuses on a productive model from the ecological industry, based on the example of the biosphere as a recycling machine. Requiring the elimination of the concept of residues, the system can be summarised by the following cycle: recycling-manufacturing-recycling.

The hypothesis posed is as follows: in the aforementioned environment, with the technology presently available, a management system can be developed for resources used in the building life cycle - a system capable of approximating that of the closed material cycle. This research determines that conventional building construction in the local sphere currently manages a recycling value of 10% of used resources. The management system developed defines strategies that bring it as close as possible to 100% recycling. The key was in finding ways to avoid the consumption of non-renewable resources and the emission of harmful residues, throughout the life cycle of the building.

The study area is defined by the industrialised construction, modular and lightweight, applied to housing. In particular, by systems that are commercialised under a renting system (making it possible to return the modules to the factory once their useful life is over, therefore recuperating resources). Diffusion of the system across various countries of the world, with small variations, including the simplification of the manufacturing process, construction and maintenance used, allow us to assume that the outreach of the management model proposed for closed cycles could extend to other types of industrialised architecture, and other uses and geographical spheres. Thus gaining a wider repercussion.

Resumen

Esta tesis doctoral tiene por objeto el estudio teórico y experimental de las posibilidades de la arquitectura industrializada, modular y ligera aplicada a la vivienda, como construcción sostenible.

La condición de sostenibilidad, desde el punto de vista físico, se define como el cierre de los ciclos materiales, alcanzándose éste en un sistema determinado cuando no existen flujos de residuos sino que los recursos se reciclan constantemente. Tal condición encuentra un fuerte obstáculo en el modelo productivo que caracteriza a la mayor parte de la industria contemporánea, nacido en la revolución industrial, que puede sintetizarse en la secuencia lineal extracción>fabricación>residuo. En oposición a ello, el modelo productivo en el que se centra investigación es el de la ecología industrial y se basa en el ejemplo de la biosfera como máquina de reciclar. Supone la eliminación del concepto de residuo y puede resumirse en el ciclo reciclaje-fabricación-reciclaje.

La hipótesis planteada es que, en el ámbito descrito y con la tecnología actualmente disponible, se puede desarrollar un sistema de gestión de los recursos empleados en el ciclo de vida de los edificios capaz de aproximarse significativamente al cierre de los ciclos materiales. La construcción convencional de edificios en el ámbito local alcanza, tal como se determina en esta investigación, una tasa de reciclaje de un 10% de los recursos empleados. El sistema de gestión desarrollado define las estrategias que lo aproximan el máximo posible al 100% de reciclaje. Encontrar las maneras de evitar el consumo de recursos no renovables y la emisión de residuos contaminantes a lo largo del ciclo de vida del edificio fueron las claves para ello.

El campo de estudio está definido por la construcción industrializada, modular y ligera aplicada a la vivienda. En especial, por los sistemas que se comercializan bajo el sistema de alquiler (que hace posible que los módulos regresen a la fábrica una vez cumplida su vida útil, recuperándose sus recursos). Su difusión en muchos países del mundo con ligeras variaciones constructivas, así como la sencillez de los procesos de fabricación, construcción y mantenimiento que emplean permiten suponer que el alcance del modelo de gestión propuesto para el cierre de ciclos podrían extenderse a otros tipos de arquitectura industrializada, otros usos y otros ámbitos geográficos, pudiendo de esta manera llegar a alcanzar una mayor repercusión.

Objetivos

Objetivo principal

Realizar una investigación sobre las posibilidades que la arquitectura tiene en la actualidad para cerrar sus ciclos materiales, determinando esta condición de forma cuantitativa y cualitativa, en la escala de la edificación, en el uso de vivienda y en el tipo constructivo industrializado, ligero y modular.

Objetivos complementarios

- Establecer un marco teórico en que relacione las demandas físicas de la sostenibilidad con la arquitectura, caracterizando sus impactos y sus posibles soluciones.
- Rescatar la experiencia de interés ambiental de la evolución de la construcción prefabricada y ligera aplicada a la vivienda.
- Estudiar el impacto ambiental de diferentes sistemas de producción de la edificación, en particular respecto de la construcción industrializada, ligera y modular.
- Determinar un sistema constructivo optimizado y las características principales que deberían cumplir sus sistemas industrial y comercial para poder cerrar los ciclos materiales.

Estructura y contenidos de esta investigación

Se trata de una investigación que puede entenderse en dos fases. Una primera formada por los capítulos 1 a 5 que razona, apoyándose en aspectos cuantitativos, sobre qué se entiende por sostenibilidad, qué significa para la arquitectura asumir el reto que ella supone, cómo puede aprovecharse la experiencia de la industrialización y qué propuesta se plantea formular. Y una segunda formada por los capítulos 6 a 10 que desarrolla, apoyándose en también en aspectos cuantitativos, la metodología, el análisis, la evaluación y la propuesta específica de sistema constructivo, industrial y comercial que se propone.

En la primera fase,

- El capítulo 1 (Sostenibilidad y arquitectura: los ciclos materiales) se dedica a explorar las relaciones entre la necesidad de preservar el capital natural y el rol que la edificación tiene en ello.

- El capítulo 2 (El problema del ciclo abierto de los materiales) repasa los impactos ambientales de la arquitectura, centrando la atención en el origen común de todos ellos que es el modelo industrial lineal extracción-fabricación-uso-residuo.
- El capítulo 3 (¿Es posible cerrar el ciclo de los materiales?) propone un modelo de edificación alternativo, basado en la construcción industrializada, ligera y modular, mediante el reciclaje de los recursos y la utilización de energías renovables.
- El capítulo 4 (la consideración ambiental de la vivienda industrializada y ligera en la historia) y el 5 (la consideración ambiental de la vivienda modular y ligera en la actualidad) analizan la evolución de la construcción prefabricada y ligera en la vivienda, rescatando los aspectos ambientales de mayor interés para el cierre de los ciclos materiales.

En la segunda fase,

- El capítulo 6 (Metodología de análisis ambiental según el cierre del ciclo de los materiales) se dedica a establecer el método de evaluación a seguir, concebido como un análisis de ciclo de vida reducido complementado con una evaluación específica del grado de reciclaje de los recursos empleados.
- El capítulo 7 (Análisis ambiental comparado de construcción modular y convencional) aborda la comparación de cuatro sistemas constructivos –uno convencional y tres modulares– realizada sobre una misma tipología de edificio.
- El capítulo 8 (un prototipo modular según el cierre del ciclo de los materiales) a partir de la experiencia reunida en el capítulo anterior formula y evalúa el sistema constructivo optimizado que se propone como respuesta al reto de la sostenibilidad.
- El capítulo 9 (Un sistema de gestión según el cierre del ciclo de los materiales) plantea las condiciones que deberían reunir los sistemas industrial y comercial que hacen posible la gestión del sistema constructivo optimizado.
- El capítulo 10 (Conclusiones) agrupa las conclusiones mediante comentarios sobre cada capítulo, y sobre la tesis en su conjunto, intentando facilitar la lectura de los resultados

Índice

- 005. Prólogo
 - Por qué esta tesis
- 004. Introducción
 - Abstract (006) / Resumen (007) / Objetivos (008) / Estructura y contenidos de esta investigación (008) / Índice (010) / Acerca del autor, el director y el tutor (013)
- 015. Capítulo 1: Sostenibilidad y arquitectura: los ciclos materiales
 - 1.1 La sostenibilidad y la arquitectura (016) 1.2 La ecología industrial y la arquitectura (026)
- 039. Capítulo 2: El problema del ciclo abierto de los materiales
 - 2.1 El problema ambiental de la arquitectura (040) / 2.2 El ciclo de los materiales en la arquitectura (053)
- 065. Capítulo 3: ¿Es posible cerrar el ciclo de los materiales? Construcción industrializada
 - 3.1 Los condicionantes del ciclo abierto en la arquitectura (066) / 3.2 Las posibilidades del ciclo cerrado en la arquitectura (075) / 3.3 La investigación a desarrollar (081)
- 093. Capítulo 4: La evolución histórica de la vivienda industrializada y ligera vista desde una consideración ambiental
 - 4.1 Un análisis desde la consideración del cierre de los ciclos materiales (094) / 4.2 Evolución histórica y oportunidades ambientales (096)
- 115. Capítulo 5: El estado actual de la vivienda modular y ligera visto desde una consideración ambiental
 - 5.1 Edificios a partir de cajas (116) / 5.2 Módulos estándar (118) / 5.3 Proyectos experimentales (122) / 5.4 Edificios modulares no desconstruibles (127) / 5.5 Edificios modulares desconstruibles y reconstruibles (133) / 5.6 Características de interés ambiental en la construcción modular (140)
- 145. Capítulo 6: Metodología de análisis ambiental para la vivienda modular y ligera según el cierre del ciclo de los materiales
 - 6.1 Planteamiento (146) / 6.2 Impacto ambiental ACV resumido (148) / 6.3 El cierre del ciclo de los materiales (165)

183. Capítulo 7: Análisis ambiental comparado de diferentes tipos de construcción modular y convencional

7.1 Planteamiento (184) / 7.2 Sistema constructivo convencional (188) / 7.3 Sistema modular de hormigón (198) / 7.4 Sistema modular de madera (208) 7.5 Sistema modular de acero (218) 7.6 Síntesis comparativa (228)

241. Capítulo 8: El prototipo modular según el cierre del ciclo de los materiales

8.1 Planteamiento (242) / 8.2 Determinación de un prototipo modular optimizado (246) / 8.3 Análisis ambiental y de cierre de ciclo (255) / 8.4 Conclusiones (268)

275. Capítulo 9: El sistema de gestión según el cierre del ciclo de los materiales

9.1 Planteamiento (276) / 9.2 El ámbito industrial (279) / 9.3 El ámbito comercial (294) / 9.4 Conclusiones (298)

305 Capítulo 10: Conclusiones

10.1 Planteamiento de las conclusiones (306) / 10.2 Síntesis de las conclusiones parciales (307) / 10.3 Conclusiones de la investigación (309)

315. Epílogo

Reflexiones personales (316)

321. Glosario

333. Anexos

339. Anexo 1: Ponencias presentadas a congresos

353. Anexo 2: Propuestas presentadas a concursos

381. Anexo 3: Bibliografía

395. Anexo 4: Fichas sobre evolución histórica de la arquitectura industrializada

427. Anexo 5: Fichas sobre arquitectura industrializada, ligera y modular

447. Anexo 6: Fichas sobre impacto ambiental de los materiales

471. Anexo 7: Cuadros sobre impacto ambiental de los sistemas constructivos convencional y modulares

715. Anexo 8: Cuadros sobre impacto ambiental del sistema modular optimizado

827. Anexo 9: Encuesta sobre fabricación de módulos ligeros

Agradecimientos

A Albert Sagrera y a Fabian López, por su ayuda y sus consejos a la hora de redactar y revisar esta tesis.

Acerca del autor, del director y del tutor de la tesis



Gerardo Wadel (autor)

Arquitecto (UNLP). Especialista en Tecnología y Producción del Hábitat (UBA). Miembro de la asesoría ambiental Societat Orgànica. Profesor del Área de Construcciones en la Escuela de Arquitectura La Salle, Universidad Ramon Llull. Ha sido Director de la revista Constructiva entre 1999 y 2005 y Profesor Adjunto y Secretario General de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, entre 1994 y 1998.



Jaume Avellaneda (director de tesis)

Doctor arquitecto. Catedrático. Profesor Titular de Universidad del Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1 de la Universidad Politécnica de Cataluña UPC en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallès, ETSAV. Profesor de diversos programas de máster y doctorado y Profesor invitado en diversas universidades españolas y extranjeras. Ha sido Director de la ETSAV, Jefe del DCA1 Arquitectónicas 1 y Comisionado para la Integración al tratado de Bolonia de Convergencia Europea de Educación Superior, en la UPC.



Albert Cuchí (tutor de estudios y tutor de tesis)

Doctor arquitecto. Profesor Titular de Universidad del Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1, DCA1, de la Universidad Politécnica de Cataluña UPC en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallès, ETSAV. Profesor de programas de máster y doctorado y Profesor invitado en diversas universidades de Portugal, Italia y México, en las temáticas de sostenibilidad y arquitectura. Asesor del Ministerio de la Vivienda de España, de la Generalitat de Cataluña y de la Xunta de Galicia en temas ambientales, cambio climático y edificación.