

TESIS DOCTORAL

**LA MADERA CONTRALAMINADA
COMO ALTERNATIVA EN SISTEMAS
DE BAJA ENERGÍA ESTRUCTURAL**

AUTOR

MARIO FERNÁNDEZ FORCADA

DIRECTORES

ARTURO MARTÍNEZ BOQUERA

ADOLFO ALONSO DURÁ

PAOLO MERLINI

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE ARQUITECTURA

OCTUBRE 2015



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA



*"Es la Naturaleza y no la máquina,
el principal modelo para la arqui-
tectura."*

*"La arquitectura moderna no signifi-
ca el uso de nuevos materiales, sino
utilizar los materiales existentes de
una forma mas humana."*

*"La tarea del arquitecto consiste en
proporcionar a la vida una estructu-
ra más sensible."*

Alvar Aalto (1898-1976)



A mi padre, por deberle todo cuanto soy,

A mis directores de Tesis, por mostrarme su incondicional apoyo en tan laboriosa investigación,

A Verónica Llopis, por su inestimable colaboración,

A mi Pilar, por apoyarme darme ánimos en todos y cada uno de los momentos, especialmente los más difíciles,

A mis hijos, quienes me han dado las fuerzas necesarias para afrontar este capítulo de mi vida.

RESUMEN

La mayor parte de las estructuras utilizadas en edificación se construyen con hormigón armado y acero estructural. El empleo masivo de estos materiales supone un derroche de energía. Teniendo en cuenta que la mayor parte de la carga soportada en los edificios de viviendas es debida a su peso propio, surge la oportunidad para otros materiales más ligeros que, igualmente cumpliendo con las especificaciones normativas actuales, tienen una menor demanda de energía para su incorporación a la obra. La madera contralaminada es una gran opción frente a los sistemas estructurales convencionales.

La primera parte de la tesis doctoral versa sobre el desarrollo de un modelo de cálculo por elementos finitos que simule el comportamiento estructural ortotrópico y bidimensional de las losas de madera contralaminada, con su posterior contraste con ensayos de laboratorio a flexión simple y compresión, mediante un cálculo para un sistema de respuesta lineal elástico.

Con el modelo de cálculo anterior validado, se ha realizado un cálculo estructural en los tres sistemas estructurales mencionados, hasta el cumplimiento de los requisitos estructurales exigidos por los Eurocódigos. Posteriormente se ha cuantificado la demanda de energía primaria y emisiones de CO₂, sea en la fase de construcción como en la fase de utilización del edificio. Los capítulos estudiados son estructura y cerramientos del edificio. Se han utilizado como muestra dos tipologías de vivienda que representan la actual casuística en materia de edificación residencial. Para el periodo de utilización se han simulado energéticamente las muestras. El resultado demuestra una mayor eficiencia energética en la madera contralaminada.

Ante los resultados obtenidos en materia de eficiencia estructural, surge la inminente pregunta sobre la posibilidad de construir el completo parque inmobiliario en madera contralaminada. Para resolver esta cuestión de un modo riguroso la última parte de la tesis doctoral presenta un modelo matemático que permite el análisis simulado de la sostenibilidad en la producción de madera talada para su uso como elemento estructural masivo en edificación.

De este modo, mediante un modelo único adaptable en determinados aspectos a cualquier nación, se puede obtener la viabilidad de una explotación sostenible de los bosques, con tasas de extracción inferiores al 100%, para dar servicio a todo un sector edificación, que representa un elevado porcentaje de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Para el caso concreto de España, se han utilizado las previsiones demográficas de los próximos cuarenta años como periodo del modelo. Los resultados demuestran en el caso de España una mayoría de escenarios sostenibles en el periodo de ensayo.

Most of the structures used in building are built with reinforced concrete and structural steel. The massive use of these materials is a waste of energy. Given that most of the load carried in residential buildings is due to its own weight, the opportunity arises for other lighter materials, also complying with current regulatory specifications, have a lower energy demand for incorporation to work. The laminated wood is a great alternative to conventional structural systems.

The first part of the thesis deals with the development of a model of finite element to simulate the orthotropic two-dimensional structural behavior of cross-laminated timber with later contrast to laboratory tests to bending and compression models by a calculation for a system of linear elastic response.

With the model validated above calculation, we have performed a structural analysis on these three structural systems to comply with the structural requirements of the Eurocodes. Subsequently the demand for primary energy and CO₂ emissions are quantified, either in the construction phase and the period of use of the building. The chapters are studied structure and building envelope. Have been used as displays two types of housing representing the current case mix in residential building. For the period of energy use is simulated sample. The result shows greater energy efficiency in laminated wood with primary energy savings of up to 35% and CO₂ emissions by about 97%.

To the results obtained in structural efficiency, the imminent question arises about the possibility of building the entire housing stock in laminated wood. To resolve this issue in a rigorous way, the last part of the thesis presents a mathematical model to enables the analysis of a simulation of the sustainability of the use of timber as a major structural component in construction

Thus, using a unique model, which could be adapted to the particular characteristics of any country, the viability of a sustainable use of woodland can be verified, with extraction rates below 100%, in order to supply an industry, which accounts for a high percentage of the carbon dioxide emissions released into the atmosphere. In the specific case of Spain, the demographic forecasts for the next 40 years were used as the basis on which to establish the operational period of the model.

La major part de les estructures utilitzades en edificació es construeixen amb formigó armat i acer estructural. L'ocupació massiva d'estos materials suposa un malbaratament d'energia. Tenint en compte que la major part de la càrrega suportada en els edificis de vivendes és deguda al seu pes propi, sorgix l'oportunitat per a altres materials més lleugers que, igualment complint amb la normativa actual, tenen una menor demanda d'energia per a la seua incorporació a l'obra. La fusta contralaminada és una gran opció enfront dels sistemes estructurals convencionals.

La primera part de la tesi doctoral versa sobre el desenvolupament d'un model de càlcul per elements finits que simule el comportament estructural ortotròpic i bidimensional de les lloses de fusta contralaminada amb el seu posterior contrast amb assajos de laboratori a flexió simple y compressió, per mitjà d'un càlcul per a un sistema de resposta lineal elàstic.

Amb el model de càlcul anterior validat, s'ha realitzat un càlcul estructural en els tres sistemes estructurals mencionats, fins al compliment dels requisits estructurals exigits pels Eurocodis. Posteriorment es quantifica la demanda d'energia primària i emissions de CO₂, siga en la fase de construcció com en el període d'utilització de l'edifici. Els capítols estudiats són estructura i tancaments de l'edifici. S'han utilitzat com a mostra dos tipologies de vivenda que representen l'actual casuística en matèria d'edificació residencial. Per al període d'utilització s'ha simulat energèticament la mostra. El resultat demostra una major eficiència energètica en la fusta contralaminada.

Davant dels resultats obtinguts en matèria d'eficiència estructural, sorgix la imminent pregunta sobre la possibilitat de construir el complet parc immobiliari en fusta contralaminada. Per a resoldre esta qüestió d'una manera rigorosa, l'última part de la tesi presenta un model matemàtic que permet l'anàlisi simulat de la sostenibilitat en la producció de fusta talada per al seu ús com a element estructural massiu en edificació.

D'esta manera, per mitjà d'un model únic adaptable en determinats aspectes a qualsevol nació, es pot obtenir la viabilitat d'una explotació sostenible dels boscos, amb taxes d'extracció inferiors al 100%, per a donar servici a un sector que representa un elevat percentatge de les emissions de CO₂ a l'atmosfera. Per al cas concret d'Espanya, s'han utilitzat les previsions demogràfiques dels pròxims quaranta anys com a període del model. Els resultats demostren en el cas d'Espanya una majoria d'escenaris sostenibles en el període d'assaig.

La maggior parte delle strutture edilizie sono costruite in calcestruzzo armato e acciaio strutturale. L'impiego massivo di questi materiali è uno spreco di energia. Se, inoltre, si tiene in conto che la maggior parte del carico presente negli edifici residenziali è dovuto al peso proprio, si sente la necessità di utilizzare altri materiali più leggeri che, pur rispettando le attuali normative, hanno un fabbisogno energetico inferiore nella fase di produzione e anche di messa in opera nell'edificio. L'XLAM è una importante opzione di fronte ai convenzionali sistemi strutturali.

La prima parte della tesi di ricerca si occupa dello sviluppo di un modello di calcolo per elementi finiti sul comportamento strutturale ortotropico e bidimensionale degli elementi fatti in XLAM e la successiva verifica con prove di laboratorio a flessione e compressione, attraverso un calcolo per un sistema di risposta lineale elastico.

Con il modello di calcolo precedentemente convalidato, si è proceduto ad un calcolo strutturale, per i due sistemi strutturali citati e per quello del XLAM, conforme ai requisiti strutturali degli Eurocodici. Successivamente si è quantificata la richiesta di energia primaria ed emissioni CO₂, sia nella fase di costruzione che nella fase di utilizzo dell'edificio. I capitoli studiati sono struttura ed involucro dell'edificio. Sono stati utilizzati come campioni due tipi di alloggi che rappresentano il mix caso attuale in edifici residenziali. Per il periodo di utilizzo dell'edificio si è simulato il comportamento energetico di campioni. Il risultato dimostra una maggior efficienza energetica nel legno controlamellare.

Di fronte ai risultati ottenuti in termini di efficienza strutturale, sorge indubbiamente la questione sulla possibilità di costruire l'intero parco edilizio in legno controlamellare. Per risolvere questo problema in modo rigoroso l'ultima parte della tesi di ricerca presenta un modello matematico che permette l'analisi simulata della sostenibilità nella produzione di legname tagliato per uso massivo come elemento strutturale nell'edilizia.

Quindi, utilizzando un unico modello adattabile per certi aspetti a qualsiasi nazione, è fattibile ottenere una gestione forestale sostenibile, con tassi di estrazione inferiori al 100%, per dare servizio a un settore che rappresenta una percentuale elevata di emissioni di CO₂ in atmosfera. Per il caso specifico della Spagna, sono state utilizzate le previsioni demografiche per i prossimi quarant'anni come periodo di modello. I risultati mostrano nel caso di Spagna una maggioranza sostenibile tra tutti gli scenari nel periodo di prova del modello.





ÍNDICE



1. Introducción	19
1.1. ¿Por qué la madera contralaminada?.....	21
1.2. La composición arquitectónica mediante la superficie.....	39
1.2.1. Flexibilidad en el uso del material.....	41
1.2.2. La transformación del apoyo puntual en un contenedor.....	46
2. Objetivos y metodología de la tesis	59
3. Antecedentes	65
3.1. Elasticidad en los materiales ortótropos.....	67
3.1.1. Introducción al análisis de la madera como material ortótropo.....	69
3.1.2. Análisis plano del estado tensional de la madera.....	71
3.1.3. Obtención de las constantes elásticas de la madera.....	75
3.1.4. Formulación de la rigidez en elementos finitos superficiales.....	76
3.2. Formulación actual del comportamiento ortotrópico de paneles CLT.....	83
3.2.1. Métodos de cálculo.....	85
3.2.2. Comprobación de estados límite últimos.....	86
3.2.3. Cálculo de la capacidad de carga.....	92
3.2.4. Comprobación de estados límite de servicio.....	94
3.2.5. Sismo en madera contralaminada.....	95
3.3. Análisis de ciclo de vida y eficiencia estructural en edificación.....	99
3.3.1. Escenario energético. Consumo de energía y emisiones CO ₂ en edificación.....	101
3.3.2. Eficiencia estructural.....	107
3.3.3. El método de Análisis de Ciclo de Vida.....	111
3.4. Uso masivo de madera en edificación y crecimiento forestal en España... 127	
3.4.1. Demanda de volumen maderero del sector edificación en España... 129	
<i>Demanda de viviendas de nueva construcción</i>	129
<i>Demanda en rehabilitación y demoliciones</i>	144
3.4.2. Producción forestal en España..... 149	
<i>Crecimiento en los bosques españoles</i>	149
<i>Sector maderero. Producción conífera. Expectativas</i>	154
3.4.3. Variables modificadoras de la producción maderable en España..... 162	

4. Modelo de simulación por elementos finitos del comportamiento estructural de la madera contralaminada utilizada como losa bidireccional.....	167
4.1. Interpretación de la ortotropía en EF mediante análisis lineal en láminas...	169
4.2. Validación del modelo de EF en paneles de madera contralaminada.....	175
4.2.1. Comportamiento estático. Ensayo a flexión.....	177
4.2.2. Comportamiento estático. Ensayo a compresión.....	181
4.3. Discusión de resultados.....	185
5. Análisis comparativo de energía embebida y emisiones de CO₂ en estructuras convencionales de edificación en Europa. Ventajas en el uso de la madera contralaminada.....	193
5.1. Selección de muestras de vivienda utilizadas y metodología empleada...	197
5.1.1. Modelo de vivienda unifamiliar asilada.....	202
5.1.2. Modelo de bloque de viviendas entre medianeras.....	207
5.2. Coste energético y en emisiones CO ₂ de la fase de construcción.....	215
5.3. Eficiencia energética y en emisiones CO ₂ en fase de utilización del edificio.....	225
5.4. Efecto sumidero y emisiones netas de CO ₂	237
5.5. Discusión de resultados.....	245
6. Modelización matemática para el análisis de la sostenibilidad en el uso masivo de la madera contralaminada en el sector edificación. El caso de España.....	257
6.1. Modelización matemática.....	261
6.2. Programación del modelo, variables y ecuaciones.....	265
6.3. Validación del modelo.....	275
6.4. Diseño de experimentos.....	283
6.5. Discusión de resultados.....	289
7. Conclusiones.....	297
8. Investigación ulterior.....	315
9. Bibliografía.....	319





1. INTRODUCCIÓN



1.1. ¿Por qué la madera contralaminada?



La presente tesis doctoral trata de demostrar la indudable relación que deben mantener Naturaleza y construcción para garantizarnos un futuro sostenible, en el ámbito de la arquitectura.

El edificio como artefacto exosomático del hombre, es un proceso continuo en el que en el que tanto los llamados materiales de construcción como las sustancias energéticas se descomponen y regeneran. Efectivamente el edificio alberga procesos, pero él mismo es también un proceso y ambas circunstancias demandan la presencia de energía. A la primera la denominamos energía primaria de utilización, y a la segunda energía primaria de construcción (Fernández, 1991)

Desde un punto de vista histórico, el uso de la madera como elemento estructural nace prácticamente desde el inicio de la arquitectura, entendida como instrumento para protegerse del medio. Construcciones históricas revelan cómo el uso de la madera en barras arriostradas permite alcanzar los requisitos de seguridad estructural. (Ceccotti et al. 2010)

El objetivo principal consiste en demostrar la mayor conveniencia de un sistema constructivo de relativa novedad en el contexto de un sector constructivo cada vez más complejo, y donde la energía es y será la moneda de cambio de una gran cantidad de decisiones.

Así pues, el tablero contralaminado nace como evolución mixta del tablero laminado y las estructuras tipo balloon frame. A pesar de poseer una larga tradición en centro-Europa, no es hasta finales del siglo XX cuando surge una tecnología capaz de conformar un material tan sencillo en su concepción, pero tan difícil de controlar sus características mecánicas debido a la anisotropía del material base y la plataforma necesaria para su fabricación, así como intereses económicos, que en último término, son quienes definen la viabilidad del proyecto.

Previamente al desarrollo del estado de la cuestión, como introducción a la concepción del material, se detalla su proceso de fabricación, así como los componentes principales de su instalación como sistema estructural y constructivo. Posteriormente se ejemplifica el montaje tridimensional del sistema que compondrá estructura y cerramiento del edificio.

De este modo, a través del siguiente diagrama, se especifican los elementos cons-

tituyentes del sistema estructural y constructivo donde la madera es la protagonista:



Fig. 1 - Esquema elementos constituyentes sistema madera contralaminada.

PANELES

Madera Aserrada

Los paneles de madera contralaminada están formados por tablas de madera de conífera formando varias capas de madera aserrada encoladas entre sí perpendicularmente. En sentido longitudinal se realiza una unión dentada de tablas. Esta disposición cruzada de las láminas longitudinales y transversales, genera que el alabeo y la contracción en la superficie del tablero se reduzcan a un mínimo insignificante y además hace que las cargas se puedan transmitir en todas las direcciones no como sucede en el caso de los soportes y las vigas. La resistencia estática y la rigidez aumentan considerablemente

Existe posibilidad de encolado lateral de tablas aunque no es habitual salvo para cargas muy superiores a las habituales para este sistema. Los espesores de tabla oscilan entre 6 y 45 mm. Las tablas empleadas en la constitución de cada lámina, tienen un ancho de entre 8 y 25 cm. La relación ancho / espesor de 4 / 1.



Fig. 2 - Proceso selección tablas mediante sistema láser de identificación de propiedades.
KLH massivholz GMBH.



Fig. 3 - Unión en finger-joint longitudinal de las tablas. KLH massivholz GMBH.

Los grosores de las láminas varían en función del formato de las placas y de la construcción. Dependiendo de la humedad de equilibrio esperada, se encolan las láminas, secadas mediante procedimientos técnicos, con una humedad del 12% (+/-2) descartando así la presencia de parásitos, hongos e insectos.

En las imágenes siguientes se muestra el proceso de producción de este tipo de paneles.

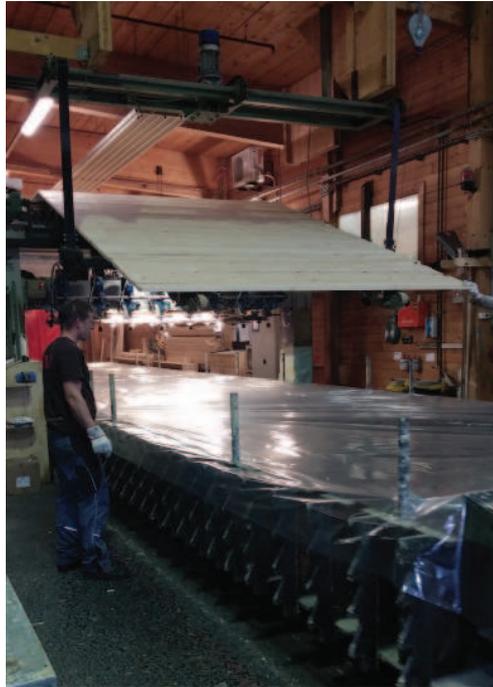


Fig. 4 - Formación de panel de muro tipo QD. KLH massivholz GMBH.



Fig. 5 - Golpeteo manual para ajuste optimo de tablas. KLH massivholz GMBH.

Adhesivos

Las láminas de madera se encolan en números impares y son tratadas a alta presión, hasta convertirse en placas de madera maciza de gran formato. En función de las exigencias estructurales se encolan 3, 5, 7 o más capas hasta un espesor máximo de 50 cm. En el proceso de encolado se utilizan adhesivos aprobados para su uso estructural. Generalmente la industria emplea colas libres de compuestos orgánicos volátiles o formaldehído. La aplicación de la cola es automatizada y completa. El porcentaje de pegamento es de 0,2 kg/m² y junta de cola, con una presión de 6 kg/m².

Resulta realmente importante la interacción en la presión de encolado, así como de la aplicación del adhesivo en la propiedades del material (cortante y deslaminación), pero sobretodo para prevenir el fallo por cortante perpendicular a la fibra (rolling shear).



Fig. 6 - Introducción de adhesivo entre láminas. KLH massivholz GMBH.

Para el encolado se utilizan adhesivos de poliuretano. En la siguiente figura se muestra la relación entre flecha inicial y diferida de cuatro vigas de madera laminada sometidas a una simulación de carga de 10 años con adhesivo PURBOND 110 y con adhesivos con formaldehído.

Los resultados son muy similares y permiten una utilización de adhesivos libres de sustancias nocivas como el compuesto nombrado anteriormente

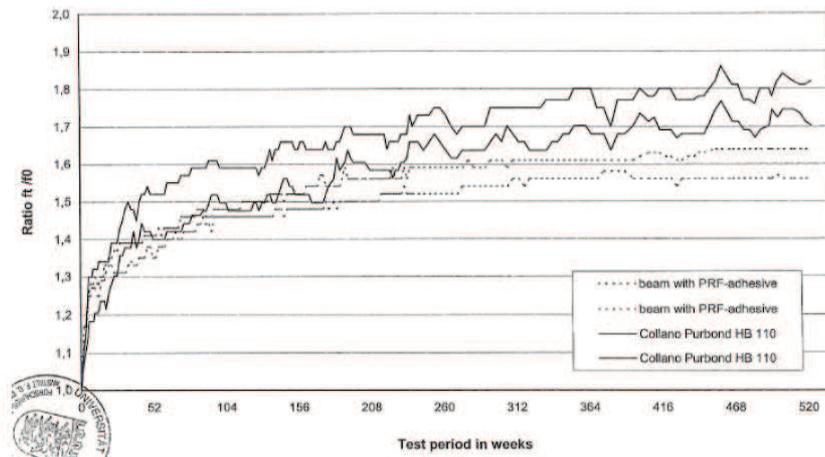


Fig. 7 - Relación de flechas inicial y diferida mediante ensayo. PURBOND.

Concluido el encolado tenemos ya fabricado el panel de madera contralaminada preparado para su secado en alta presión, según detallan las figuras posteriores.



Fig. 8 - Plástico del panel para posterior secado. KLH massivholz GMBH.

Se elaboran básicamente dos tipos de paneles de madera contralaminada. Los que funcionan como muros de cortante y los que funcionan como losa horizontal, generalmente en modo unidireccional y en ocasiones en modo bidireccional. A continuación se expone el listado de secciones disponibles de la mayor empresa fabricante de madera contralaminada siendo los paneles CT los que sirven como muro y los paneles CL, los que funcionan como losa.

CAPA DE CUBIERTA ORIENTADA EN EL SENTIDO TRANSVERSAL DE PLACA CT (PARED)

Grosor nominal en mm	En capas	Estructura de planchas [mm]					Anchos de placa estándares (m)	Largo de placa máximo (m)
		T	L	T	L	T		
57	3 c	19	19	19			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
72	3 c	19	34	19			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
94	3 c	30	34	30			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
120	3 c	40	40	40			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
95	5 c	19	19	19	19	19	2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
128	5 c	30	19	30	19	30	2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
158	5 c	30	34	30	34	30	2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50

CAPA DE CUBIERTA EN EL SENTIDO LONGITUDINAL DE LA PLACA CL (CUBIERTA/TEJADO)

Grosor nominal en mm	En capas	Estructura de planchas [mm]							Anchos de placa estándares (m)	Largo de placa máximo (m)
		L	T	L	T	L	T	L		
60	3 c	19	22	19					2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
78	3 c	19	40	19					2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
90	3 c	34	22	34					2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
95	3 c	34	27	34					2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
108	3 c	34	40	34					2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
120	3 c	40	40	40					2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
95	5 c	19	19	19	19	19			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
117	5 c	19	30	19	30	19			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
125	5 c	19	34	19	34	19			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
140	5 c	34	19	34	19	34			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
145	5 c	34	21,5	34	21,5	34			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
162	5 c	34	30	34	30	34			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
182	5 c	34	40	34	40	34			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
200	5 c	40	40	40	40	40			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
201	7 c	34	21,5	34	22	34	21,5	34	2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
226	7 c	34	30	34	30	34	30	34	2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
208	7 cc	68	19	34	19	68			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
230	7 cc	68	30	34	30	68			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
248	7 cc	74	30	40	30	74			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
* 260	7 cc	80	30	40	30	80			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
* 280	7 cc	80	40	40	40	80			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
* 247	8 cc	68	21,5	68	21,5	68			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
* 300	8 cc	80	30	80	30	80			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50
* 320	8 cc	80	40	80	40	80			2,40 / 2,50 / 2,72 / 2,95	16,50

Fig. 9 - Detalle de secciones y tipos de panel disponibles en fabricación. KLH massivholz GmbH.

Mecanizado del panel

Posteriormente al secado el panel está listo para su mecanizado según especificaciones de proyecto. El panel de madera contralaminada presenta una alta precisión dimensional gracias a la tecnología CNC (control numérico por computadora).



Fig. 10 - Mecanizado de los paneles mediante control numerico. KLH massivholz GMBH.

FIJACIONES METÁLICAS

La recepción de los paneles de madera contralaminada se realiza a través de fijaciones metálicas en acero. Tirafondos para las cargas verticales y angulares absorben los esfuerzos horizontales del panel.

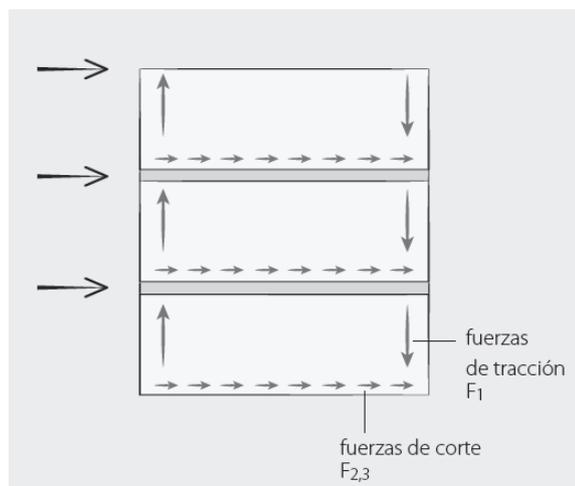


Fig. 11 - Esfuerzos horizontales y solicitaciones de la estructura. Rothoblaas.

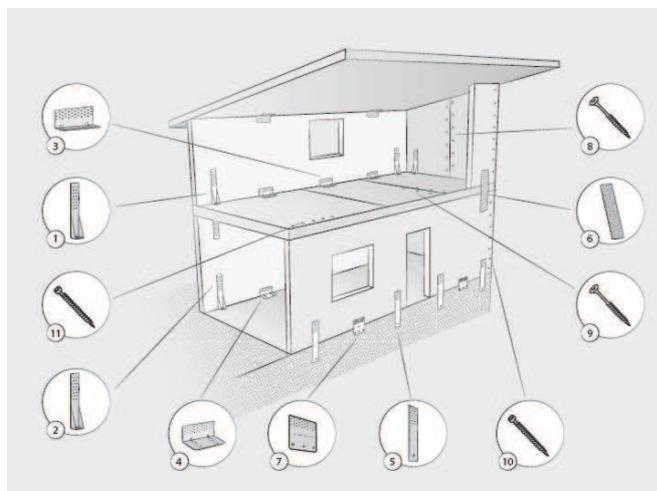


Fig. 12 - Tipos de fijaciones según sollicitación y situación. Rothoblaas.

A continuación se exponen los angulares que sirven para la absorción de las fuerzas de tracción. Su colocación se sitúa en las esquinas y huecos de la estructura, que son los puntos más solicitados.



Fig. 13 - Fijación para absorción de tracciones. Rothoblaas.

configuración	VALORES CARACTERÍSTICOS												
	R _{ik} MADERA				R _{ik} ACERO			R _{ik} HORMIGÓN NO RANURADO			R _{ik} HORMIGÓN RANURADO		
	fijación agujeros Ø5			R _{ik,madera} [kN]	arandela	R _{ik,acero}		anclaje VINYLPRO Ø x L [mm]	R _{ik,db}		anclaje EPOPLUS Ø x L [mm]		R _{ik,db}
tipo	Ø x L [mm]	n _u [unid]	[kN]			[kN]	γ _{acero}		[kN]	γ _{db}	Yeso	[kN]	γ _{db}
• fijación total • arandela WHTB550L • anclaje M20	clavos LBA	Ø4,0 x 40	45	70,7	WHTB550L	63,4	γ _{acero}	M20 x 240	120,63	1,8	M20 x 240 M20 x 290 ⁽¹⁾	60,32	2,1
	Ø4,0 x 60	45	86,9	75,39								2,1	
	tornillos LBS	Ø5,0 x 40	45	70,7	WHTB550L	63,4	γ _{acero}	M20 x 240	120,63	1,8	M20 x 240 M20 x 290 ⁽¹⁾	42,4	
	Ø5,0 x 50	45	86,9	52,1									
• fijación parcial • arandela WHTB550L • anclaje M20	clavos LBA	Ø4,0 x 40	27	42,4	WHTB550L	63,4	γ _{acero}	M20 x 240	120,63	1,8	M20 x 240 M20 x 290 ⁽¹⁾	60,32	2,1
	Ø4,0 x 60	27	52,1	75,39								2,1	
	tornillos LBS	Ø5,0 x 40	27	42,4	WHTB550L	63,4	γ _{acero}	M20 x 240	120,63	1,8	M20 x 240 M20 x 290 ⁽¹⁾	42,4	
	Ø5,0 x 50	27	52,1	52,1									
• fijación total • arandela WHTB550 • anclaje M16	clavos LBA	Ø4,0 x 40	45	70,7	WHTB550	63,4	γ _{acero}	M16 x 190	74,89	1,8	M16 x 190	41,19	1,8
	Ø4,0 x 60	45	86,9	41,19								1,8	
	tornillos LBS	Ø5,0 x 40	45	70,7	WHTB550	63,4	γ _{acero}	M16 x 190	74,89	1,8	M16 x 190	41,19	1,8
	Ø5,0 x 50	45	86,9	41,19								1,8	
• fijación parcial • arandela WHTB550 • anclaje M16	clavos LBA	Ø4,0 x 40	27	42,4	WHTB550	63,4	γ _{acero}	M16 x 190	74,89	1,8	M16 x 190	41,19	1,8
	Ø4,0 x 60	27	52,1	41,19								1,8	
	tornillos LBS	Ø5,0 x 40	27	42,4	WHTB550	63,4	γ _{acero}	M16 x 190	74,89	1,8	M16 x 190	41,19	1,8
	Ø5,0 x 50	27	52,1	41,19								1,8	

⁽¹⁾ Longitud que se puede obtener mediante barras roscadas MGS cortadas a medida

Fig. 14 - Valores característicos tracción WHT-540. Rothoblaas.

Para la absorción de los esfuerzos cortantes, se utiliza la fijación que muestra la figura siguiente. Su objetivo es el impedimento de giro en el plano del muro frente a una sollicitación horizontal.



Fig. 15 - Fijación para absorción de esfuerzo cortante. Rothoblaas.

RESISTENCIA LADO MADERA $R_{2/3}$				VALORES CARACTERÍSTICOS			VALORES ADMISIBLES
configuración sobre madera	tipo	fijación agujeros Ø5		$R_{2/3, madera}$			$V_{2/3, adm, ds}$
		Ø x L [mm]	n_v [unid]	[kN]			[kg]
clavos	LBA	Ø4,0 x 60	36	30,3			1320
tornillos	LBS	Ø5,0 x 50	36	36,3			1580

RESISTENCIA LADO HORMIGÓN $R_{2/3}$					VALORES CARACTERÍSTICOS			VALORES ADMISIBLES	
configuración sobre hormigón	tipo anclaje ⁽²⁾	fijación agujeros Ø13			$IN^{(1)}$	$R_{2/3, ds}$	$OUT^{(2)}$	γ_{ds}	$V_{2/3, adm, ds}$
		Ø x L [mm]	n_H [unid]	clase acero					
• ds no ranurado • anclaje atornillable	SKR	16 x 130	2	-	76,9	56,9	1,5	2529	
• ds no ranurado • anclaje mecánico	AB1	M16 x 138	2	-	59,5	44,0	1,5	1956	
• ds no ranurado • anclaje químico	VINYLFRO	M16 x 160	2	5,8	52,7	39,0	1,25	2080	
• ds ranurado • anclaje químico	EPOPLUS	M16 x 160	2	5,8	52,7	39,0	1,25	-	

Fig. 16 - Valores característicos tracción TITAN TCN-240. Rothoblaas.

APOYOS CIMENTACIÓN EDIFICIO

Previamente a la incorporación del sistema constructivo a la obra, es necesario un correcto apoyo que asegure principalmente dos aspectos:

1. Nivelar la superficie, generalmente irregular y no completamente horizontal, para asegurar una correcta descarga de los elementos portantes bidimensionales.
2. Realizarlo en una madera de mayor resistencia al aplastamiento que la propia de los paneles.

Para solucionar estos aspectos, se coloca en los apoyos murarios durmientes de alerce atornillados a la estructura anterior generalmente en hormigón armado.



Fig. 17 - Fotografía de obra en el norte de Italia. Apoyo estructura de madera contralaminada.

SELLADO DE JUNTAS

Una vez terminada la instalación de los paneles y a medida que llegan a obra los elementos constituyentes de los huecos (ventanas, puertas) será necesaria la incorporación de una malla sellante autoadhesiva reforzada con fibra de vidrio para garantizar la estanqueidad de la vivienda o local.

Prácticamente cualquier cinta de estas características en el mercado, que cuente con las homologaciones oportunas es capaz de soportar la acción requerida.

Montaje tridimensional de la estructura

Se ejemplifica de forma resumida a través de diversos detalles tipo, los pasos necesarios para llevar a efecto la construcción con el sistema de paneles de madera contralaminada. Iniciando por el detalle tipo de apoyo del panel sobre durmiente de madera, pasando por el encuentro de dos muros con forjado, hasta el encuentro entre dos paneles de cubierta que forman la cumbre del edificio.

También puede escogerse realizar inicialmente la envolvente para posteriormente introducir los forjados de madera contralaminada interiormente.

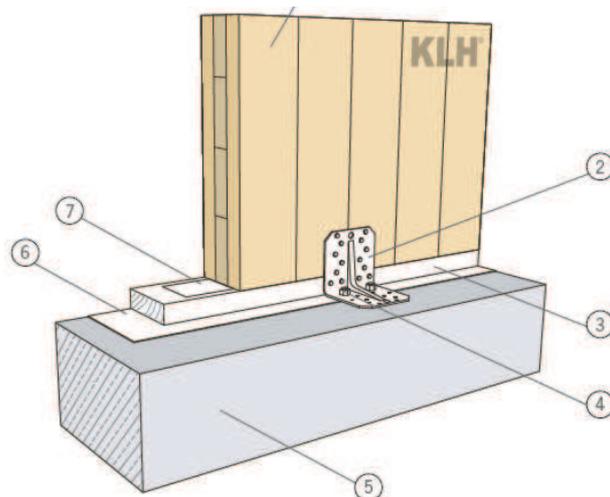


Fig. 18 - Apoyo panel sobre durmiente en alerce. KLH Massivholz.

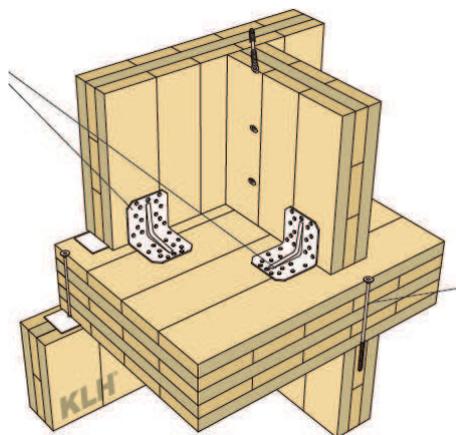


Fig. 19 - Detalle encuentro forjado con muros interior y exterior. KLH Massivholz.

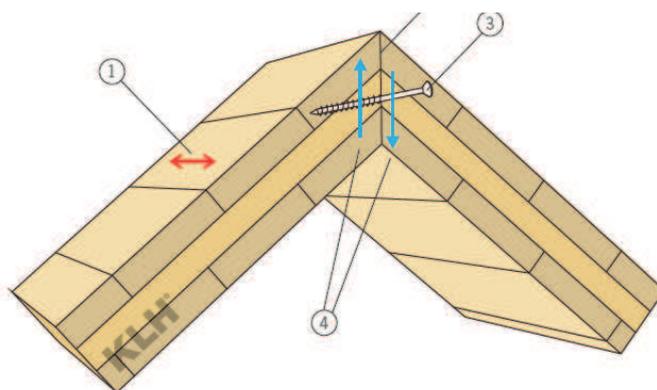


Fig. 20 - Detalle encuentro faldones de cubierta. KLH Massivholz.

Soluciones constructivas aplicadas a los paneles de madera contralaminada

Se proponen a continuación detalles constructivos referentes a la envolvente de los edificios a estudio en la fase de desarrollo de la presente tesis doctoral, con el sistema de paneles de madera contralaminada. Trasdosando el panel con un aislante de fibras de madera y acabando con un material de revestimiento se obtienen soluciones como las representadas en las siguientes figuras. La descripción completa del detalle se realizará en dicha fase de la tesis, y no en el presente capítulo.

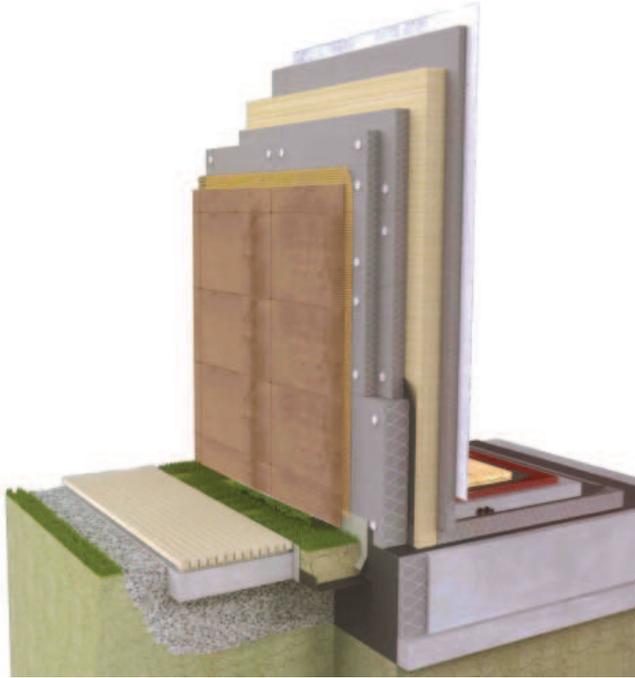


Fig. 21 - Detalle arranque de muro cerramiento. Elaboración por el autor.



Fig. 22 - Detalle construcción de solado con instalaciones embebidas. Elaboración por el autor.





1.2. La composición arquitectónica mediante la superficie



1.2.1. Flexibilidad en el uso del material

Il tema della prefabbricazione che utilizza, come elemento strutturale, il pannello di XLAM si è posto come obiettivo, quello di orientare il pensiero progettuale verso una diversa sistemazione dei singoli elementi che concorrono alla definizione di un progetto architettonico (Merlini & Basso, 2008).

L'intento di questa introduzione, non è quello di definire ed sviluppare un sistema strutturale basato nella metodologia di pannello fatto in legno, se non di pensare ad un nuovo modo di affrontare il progetto architettonico per modificare le regole compositive trasformando il sistema dom-ino composto da appoggi puntuali sui quali poi viene la struttura orizzontale, in un sistema olistico dove sia pareti che solai collaborano nella composizione già dall'inizio di essa. Questo fatto rende importante la necessaria concezione della struttura da parte di chi progetta il manufatto (Merlini & Basso, 2008).

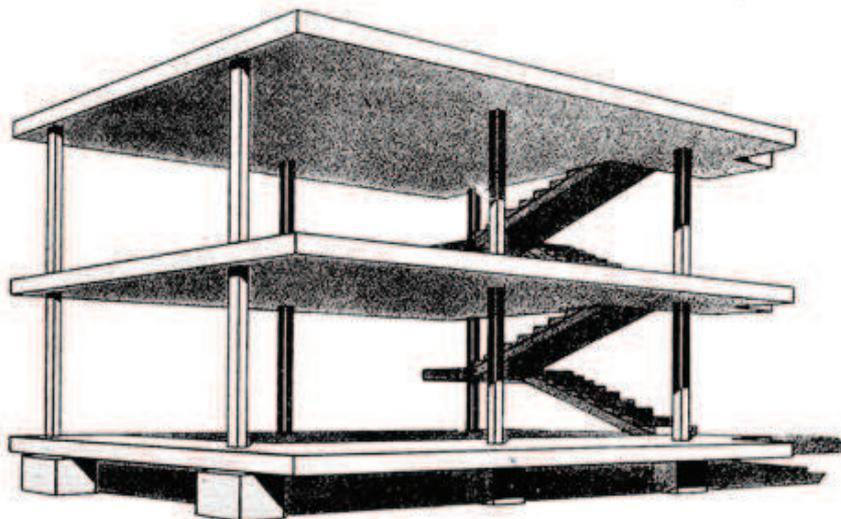


Fig. 23 - Modelo casa dom-ino. Le Corbusier.

L'abitazione, come oggetto dell'abitare, pone questioni di luogo e di relazioni urbane, di modelli spaziali e di tecniche integrate nella composizione.

La qualità, categoria presente alle origini del movimento moderno, si relaziona a tutte le fasi del processo che porta alla costruzione dell'oggetto.

Oggi, l'architettura ha dimenticato l'abitazione, lasciandola in mano all'edilizia ed alla

logica speculativa.

I nuovi scenari normativi, che si pongono l'obiettivo di definire parametri legati agli aspetti della sostenibilità, richiedono una attenzione alla qualità per non diventare solo verifiche numeriche.

L'uso di adeguati materiali porta a riflettere sulla composizione, come sempre l'architettura ha fatto nei momenti nobili, unendo questioni figurative con innovative soluzioni distributive, relazioni con il contesto con logiche di percezione e così via.

In questo quadro di riferimento l'attenzione si concentra sul tema della composizione degli edifici che utilizzano, come elemento strutturale, il pannello di legno. Una scelta che pone la necessità di formulare una riflessione capace di ricondurre le questioni tecniche all'interno del progetto.

L'obiettivo non è quello di produrre modelli d'aggregazione, ma di orientare il pensiero progettuale alla corretta sistemazione dei singoli elementi: lo stesso fine che Mies Van de Rohe si era posto progettando la casa in muratura e la casa in cemento armato. Questo modo di affrontare la ricerca sull'architettura dell'abitazione pensando ad edifici con pannelli strutturali di legno, è nato dallo studio in parte svolto di quanto progettato e costruito fino a questo momento.

L'analisi ha evidenziato una mancanza di "ricerca del limite" ed un processo compositivo che rinuncia all'architettura e punta su quello che chiamano buona edilizia, limitando l'attenzione al solo processo costruttivo dell'elemento strutturale ed agli accorgimenti per rendere tale fase più funzionale. Tutto questo, come si è detto, diviene necessario e la ricerca negli altri settori disciplinari contribuisce a meglio definire questi aspetti.

Se pensiamo, invece, alle fasi iniziali del Movimento Moderno, tutto impegnato ad approfondire la conoscenza e l'uso di vari materiali o un impiego diverso da quello già noto, questo ci aiuta a comprendere il tipo di approccio alla ricerca.

Lo spirito del nuovo e l'inesausta capacità di comprendere lo sviluppo della società, alimenta la ricerca spaziale e questa, usa i materiali come strumento per raggiungere nuovi traguardi. Il nuovo non è nei materiali, ma nella capacità di esprimere spazi e relazioni differenti, sempre ancorati nella storia in un processo di continua innovazione.

Un edificio può essere vecchio anche se usa un materiale d'avanguardia e può invece rivelarsi innovativo pur utilizzando sistemi già collaudati ma ripensati con lo spirito della ricerca. Pensiamo al valore innovativo del Padiglione Tedesco a Barcellona di Mies Van de Rohe.



Fig. 24 - Pabellón de Alemania. Mies van der Rohe.

Ripercorrere, allora, alcune esperienze più significative sarà per la ricerca un conforto, un porre, nel modo opportuno, la valutazione di questi elementi non per fornire modelli di edifici, ma per alimentare il pensiero di chi è chiamato a progettarli.

Il pensiero del progettista utilizza le conoscenze in una ricerca tesa alla definizione dello spazio e del suo significato.

La conoscenza del materiale pone l'attenzione su questioni che, un progetto in generale, ed in particolare quello inerente l'uso dei pannelli strutturali di legno, devono essere affrontate e la cui soluzione determina la qualità del prodotto e la coerenza compositiva spaziale.

Riflessioni, utili per fare chiarezza sulle varie questioni che attengono a questo elemento strutturale, mostrando gli attuali limiti e le potenzialità future, con l'obiettivo di aprire nuovi orizzonti per gli spazi abitativi.

La ricerca sviluppata, scava nel passato ed esplora possibili esperienze che possono affrontare questi problemi con lo scopo di evidenziare i giusti atteggiamenti culturali ed i temi che devono essere tenuti in debita considerazione.

“Nel 1915, Le Corbusier con la Maison Dom-ino concepisce un sistema strutturale standardizzato, assolutamente indipendente dalle funzioni della pianta dell’abitazione: nasce così il prototipo su cui sperimentare il rapporto fra struttura ed involucro destinato a diventare l’icona del Movimento Moderno. La successiva Maison Citrohan (1920), rappresenta una delle prime idee di architettura purista di Le Corbusier.

A Pessac, nel 1924, Le Corbusier progetta un insediamento residenziale. “Pessac deve servirvi da laboratorio” scrisse Frugès “mi aspetto che formulate chiaramente il problema della pianta e che ne troviate la standardizzazione. Muri, solai, e tetti devono essere improntati alla massima solidità e funzionalità e venire montati secondo il sistema tayloristico con macchine, di cui vi autorizzo l’uso”. (Merlini & Basso, 2008)

“Le Corbusier continuò incessantemente a voler applicare la dottrina del taylorismo all’edilizia per ridurre costi e tempi e per avere “economia domestica e costruzione economica”.

Il padiglione di Barcellona del 1929 e la casa modello per un celibe, esposta a Berlino nel 1931, segnano una continuità sul ruolo del muro all’interno dello spazio. Nei due progetti “ciò che divide” diviene organizzatore dello spazio; non ha funzione portante e soccombe alla maglia strutturale dei pilastri cruciformi che scandiscono implacabilmente la metrica. Per Mies, d’ora in poi, l’assioma fondamentale è la ricerca del vuoto assoluto: ovvero lo svuotamento del volume, la scarnificazione della struttura e la continuità dell’involucro su cui si proiettano figure, immagini statiche ed in movimento, riflesse nei due mondi intangibilmente separati: in e out.” (Merlini & Basso, 2008)

Dopo questa fase di rilettura di eventi noti ma con cura ripensati secondo le finalità della ricerca, si è trattato il tema della composizione degli edifici che utilizzano, come elemento strutturale, il pannello di legno.

Non esiste una sola maniera di progettare usando pannelli strutturali di legno ma, come sempre in architettura, è evidente un chiaro rapporto tra le regole del comporre e la chiarezza degli elementi che partecipano alla costruzione dell’opera.

Le qualità tecnologiche-strutturali di questo tipo di pannello e la grande flessibilità compositivo-strutturale del sistema consente invece di dare corpo a temi progettuali e spaziali che solitamente richiedono l'uso di altri materiali come il cemento armato o l'acciaio. L'uso di questa tecnologia apre prospettive rilevanti per quel che concerne l'iter progettuale, ma anche per quel che riguarda la fase esecutiva.

Le potenzialità connesse all'uso del pannello portante in legno, essendo questo un elemento unico e non composto da più elementi distinti (come nel muro tradizionale), sono correlate alla flessibilità di tale sistema costruttivo. Una questione assai importante oggi per dare risposta ai diversi modi di concepire lo spazio abitativo.

In questo senso, la scomponibilità, la flessibilità e la possibilità di sostituire o aggiungere elementi con operazioni semplici si pone al servizio di un pensiero progettuale che deve dare risposte alle differenze.

La ricerca porta un contributo sul progetto come sintesi dei vari aspetti figurativi e materiali e sugli aspetti, oggi molto importanti, che riguardano le questioni del progetto e della sua costruzione.

In questo senso, il rapporto con la filiera costruttiva è necessario e preliminare alla scelta del soggetto cui affidare la realizzazione. Un modo differente di porsi nel mercato assumendo nella progettazione anche la consapevolezza dell'esecuzione.

1.2.2. La transformación del apoyo puntual en un contenedor

Questa prima ricerca iniziale, meriterebbe di essere continuata per trattare l'aspetto compositivo e tecnologico del sistema pannello connesso alla definizione di nuovi luoghi destinati alla realtà residenziale.

In particolare, sarebbe interessante lavorare con l'intento di raggiungere una maggiore flessibilità degli spazi che identificano la forma dell'abitare.

Per raggiungere questo obiettivo è necessario indagare le possibilità e definire le qualità del sistema proposto, attraverso:

1. Una definizione dei modelli costruttivi che, ripercorrendo le fasi dal passaggio dal sistema intelaiato al sistema del pannello modulare di legno, finalizza e delimita l'ambito della ricerca;
2. Uno studio compositivo, che, sulla base della geometria, della modularità connessa alle possibilità del materiale ed alla continua ricomposizione degli elementi strutturali, determina una molteplicità di modelli spaziali e abitativi;
3. Una verifica attraverso progetti che affrontino il recupero e l'integrazione con l'esistente inteso come possibilità di riutilizzo e di trasformazione di luoghi, strutture e spazi esistenti e la realizzazione di residenze per l'emergenza e il bisogno sociale.

Sviluperemo ora i primi due punti, lasciando come ulteriore ricerca il terzo punto.

Come definizione iniziale possiamo dire che i muri sono i principali elementi che strutturano lo spazio, ma anche diventano la chiave della percezione della forma. I pilastri sono unicamente elementi strutturali, cioè, servono unicamente a uno scopo, e possono utilizzarsi per dare un'immagine di forza o fragilità, a seconda della scelta del progettista.

Quello che prevede il nuovo sistema strutturale costruito con pannelli in legno controlla-mellare è pensare al muro non soltanto come elemento il quale irrigidisce lo spazio, se non come scatola necessaria di ogni elemento architettonico abitato. La tradizione

obbliga a pensare agli elementi bidimensionali come elementi appartenenti alla cultura ma non all'attualità dell'architettura moderna e contemporanea.

La riflessione passa necessariamente per pensare al pilastro come un volume, e di conseguenza al volume come un pilastro dove, il pilastro cessa di essere un elemento puntuale, mentre il volume si arricchisce del valore strutturale.

Per mettere a confronto tutti e due sistemi si è utilizzato l'alloggio unifamiliare scelto per fare la ricerca strutturale ed energetica della presente tesi di ricerca. Nelle figure successive si mostra la capacità di tutti e due sistemi per portare i carichi al terreno e la funzionalità che lasciano in pianta. L'approccio permette di capire che il sistema bidimensionale non rompe la figurazione dell'insieme.

Data la capacità del sistema per sostituire il generale processo progettuale dove componiamo prima il volume e poi si risolve la struttura introducendo l'insieme di pilastri attraverso la regola compositiva del progetto, con il nuovo sistema in legno controlla-mellare pensiamo alla struttura fin dall'inizio inserendo le pareti portanti e capendo la materialità e realtà del progetto da molto prima. Questo permette riscrivere la regola del comporre.

Indubbiamente all'interno dovremmo lasciare la traccia della seconda dimensione, ma, dall'esperienza progettuale in questi ultimi anni, possiamo adeguare questo problema assumendo diversi punti dove necessariamente ci dovrà essere un muro per contenere qualsiasi elemento della composizione.

Per mettere a confronto tutti e due sistemi si è utilizzato l'alloggio unifamiliare scelto per fare la ricerca strutturale ed energetica della presente tesi di ricerca. Nelle figure successive si mostra la capacità di tutti e due sistemi per portare i carichi al terreno e la funzionalità che lasciano in pianta. L'approccio permette capire che il sistema bidimensionale non rompe la figurazione dell'insieme.

Lo sviluppo di una maglia compositiva per sostenere l'edificio prende ancora più forza ed è capace di aggiustarsi alle esigenze puntuali dal progetto, come di un sistema puntiforme si trattasse. Ma non solo in pianta si progetta l'architettura ma anche la sezione deve divenire composizione. Fatto questo ragionamento, nel caso che il progettista avesse la sensazione di rigidità nel comporre attraverso piani, può ottenere una vera ricchezza spaziale nella sezione.

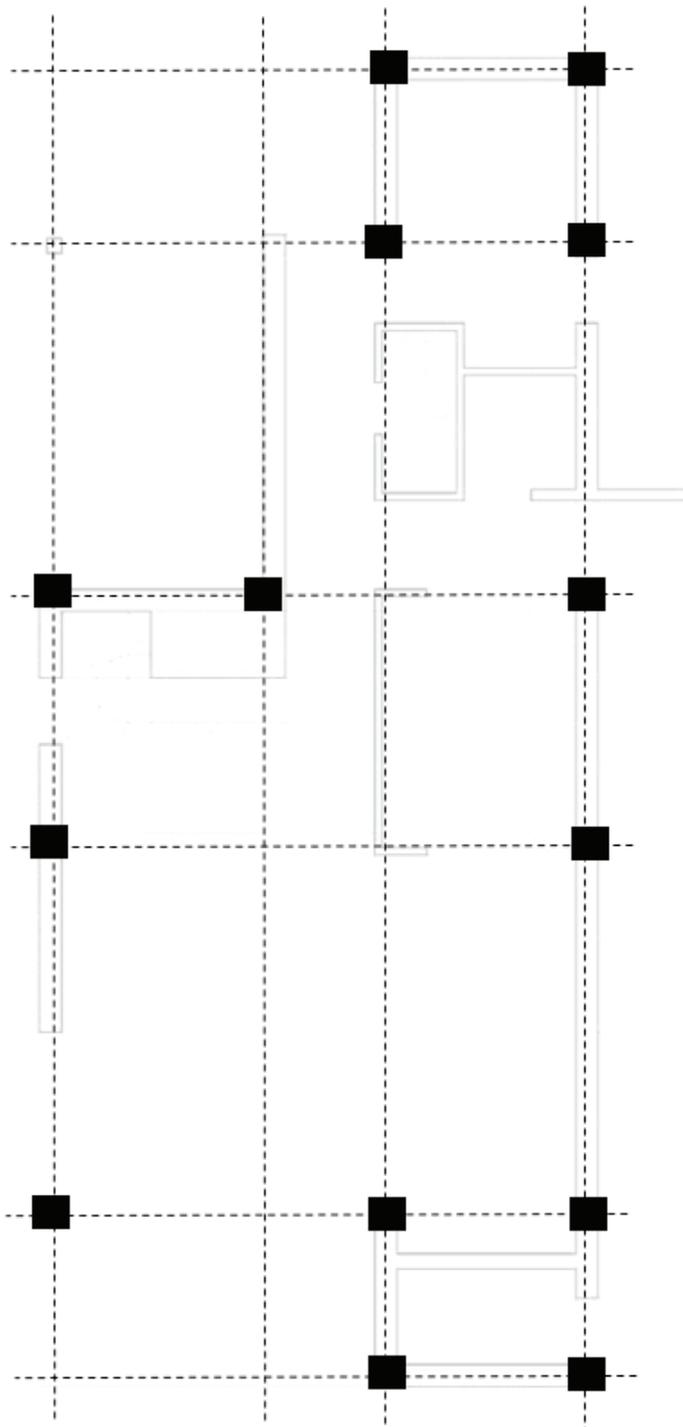


Fig. 25 - Sistema estructural vivienda unifamiliar. Planta baja con pilares. Elaboración por el autor.

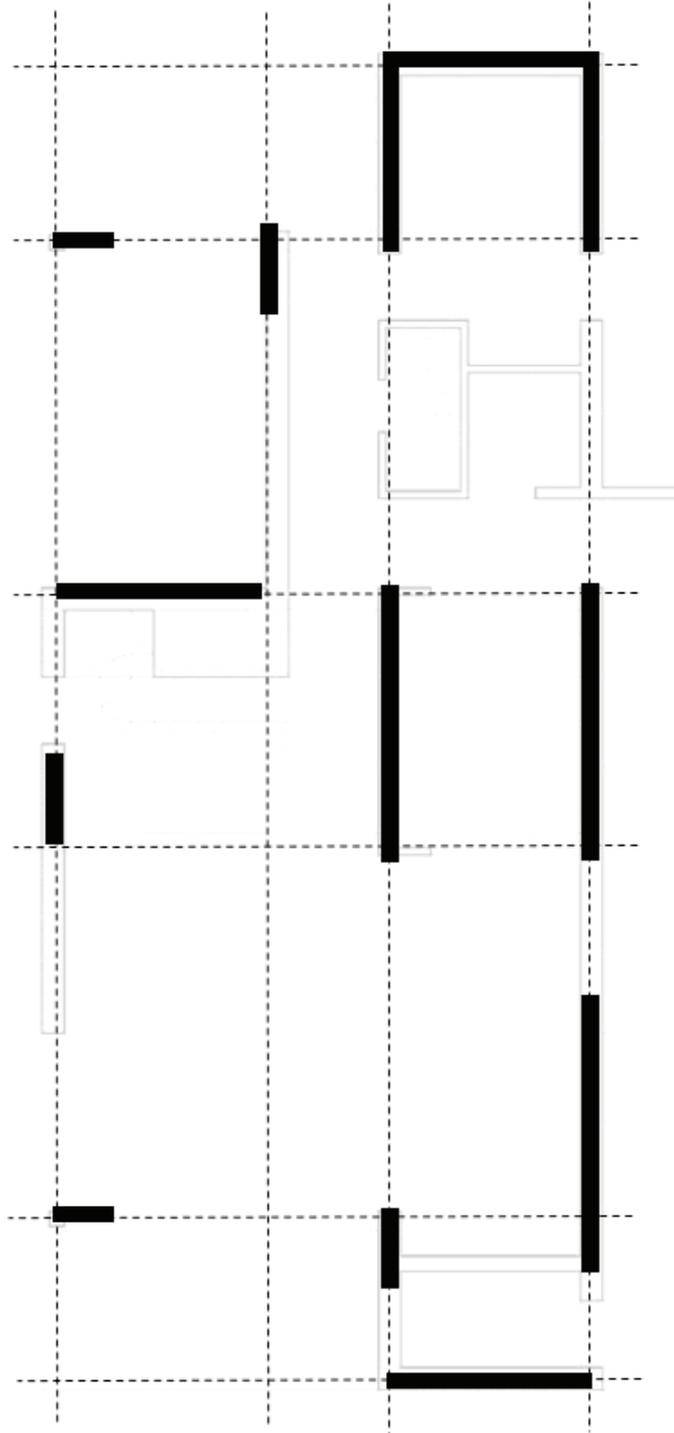


Fig. 26 - Sistema estructural vivienda unifamiliar. Planta baja con CLT. Elaboración por el autor.

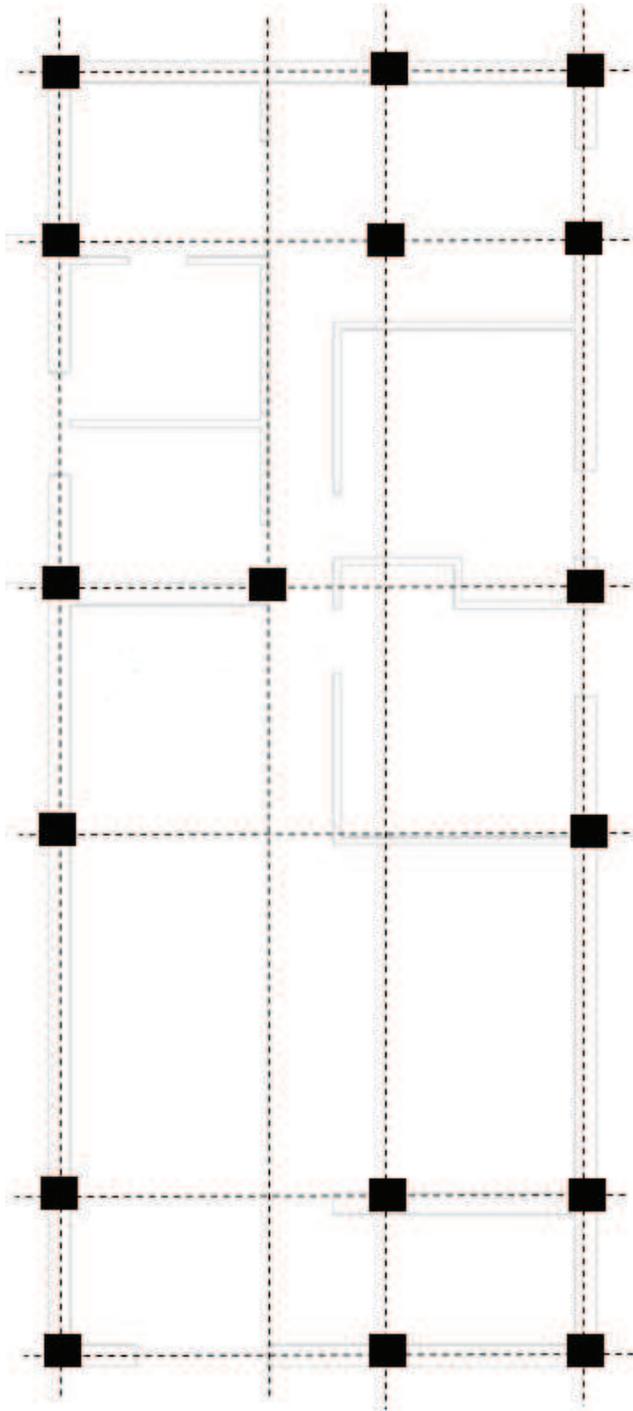


Fig. 27 - Sistema estructural vivienda unifamiliar. Planta primera con pilares Elaboración por el autor.

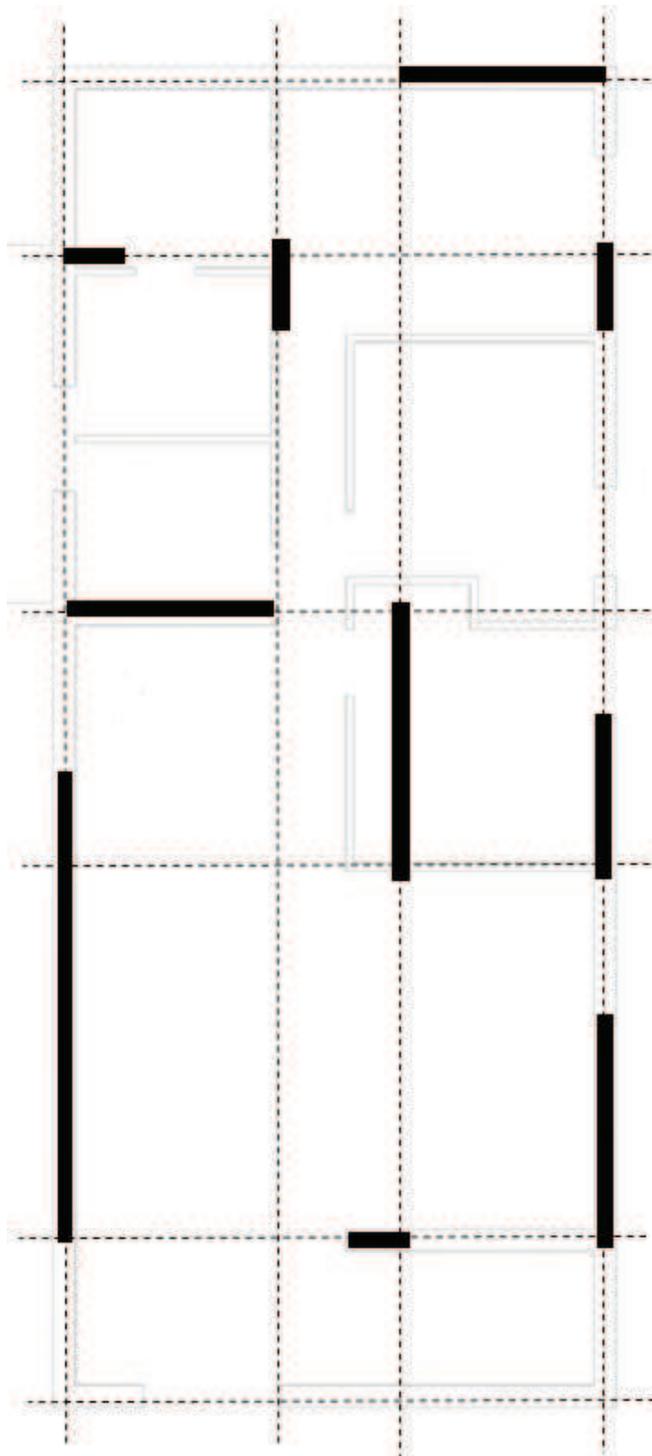


Fig. 28 - Sistema estructural vivienda unifamiliar. Planta primera con CLT. Elaboración por el autor.

A questo fatto, Josep Lluís Mateo, in una localizzazione in cui le attività portuali coesistono con sempre più ampie aree residenziali esclusive, di fronte l'atteggiamento pragmatico olandese, crea un'architettura emotiva che sarebbe comunque moderna e contestuale. Le loro case, una serie di volumi che aumentano o affondano nel mare aperto e riflettono il movimento dell'acqua che li circonda. L'analogia con il mondo della vela è evidente nell'uso del legno e giocare con diverse texture in piccoli cortili e facciate. L'edificio, costruito in questo caso con un sistema intelaiato, ma sempre in legno, utilizza muri portanti che ordinano lo spazio, lasciando la libertà alla sezione dell'alloggio.

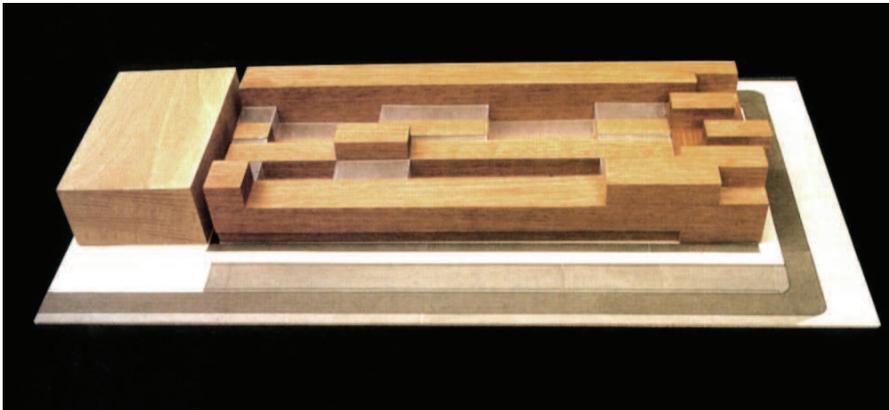


Fig. 29 - Volumetría externa en esbozo inicial de composición. (Mateo, 1999)



Fig. 30 - Imagen exterior del edificio finalizada su construcción. (Mateo, 1999)

Con riguardo alla modularità, così come un insieme di pilastri possono essere moltiplicati secondo la traccia e dimensioni dell'oggetto, succede lo stesso con il nuovo sistema sul quale si dibatte la sua viabilità in termini compositivi. La composizione con elementi bidimensionali ci permette di orientare internamente lo spazio verso delle direzioni compositive e di dare un ordine all'edificio.

Nelle seguenti immagini si mostra la validità compositiva del sistema per poter affrontare la realtà nell'ordinare gli spazi e di come si possono introdurre eccezioni al modello e la possibilità di introdurle con il nuovo sistema. Quattro esempi mostrano la capacità del sistema per inserirsi nel contesto.

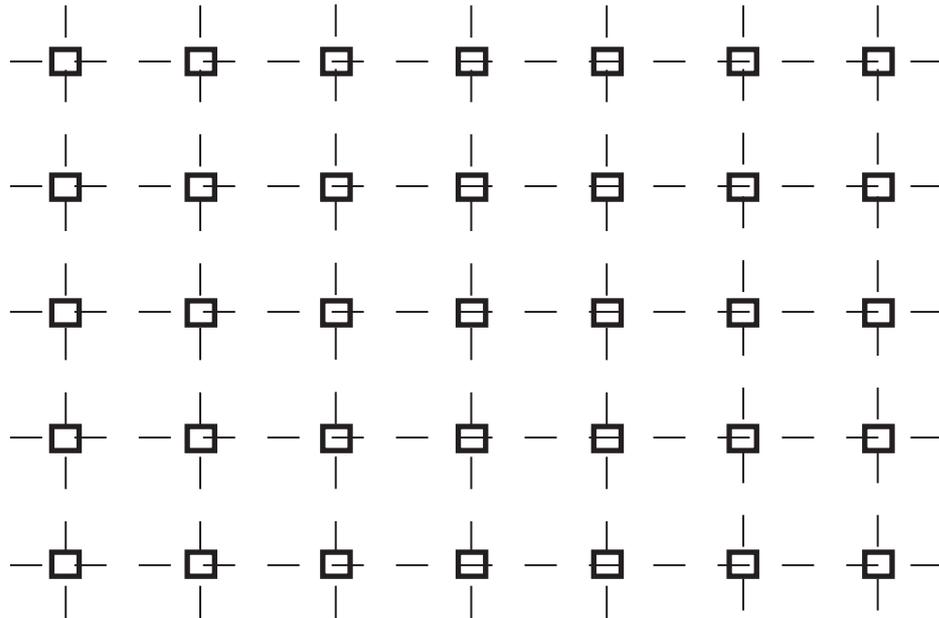


Fig. 31 - Esquema sistema estructural puntiforme mediante pilares. Elaboración por el autor.

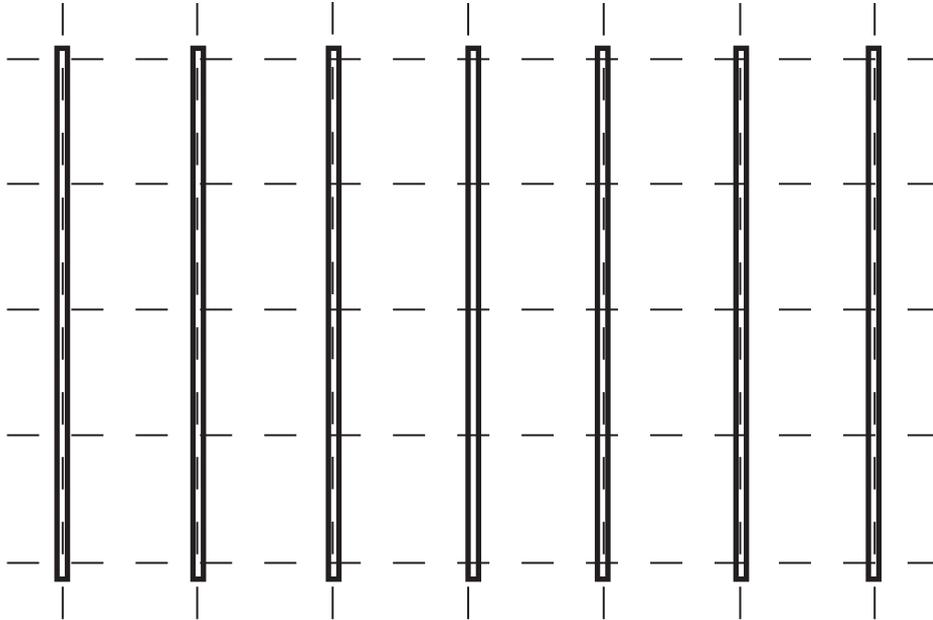


Fig. 32 - Esquema sistema estructural 1 madera contralaminada. Elaboración por el autor.

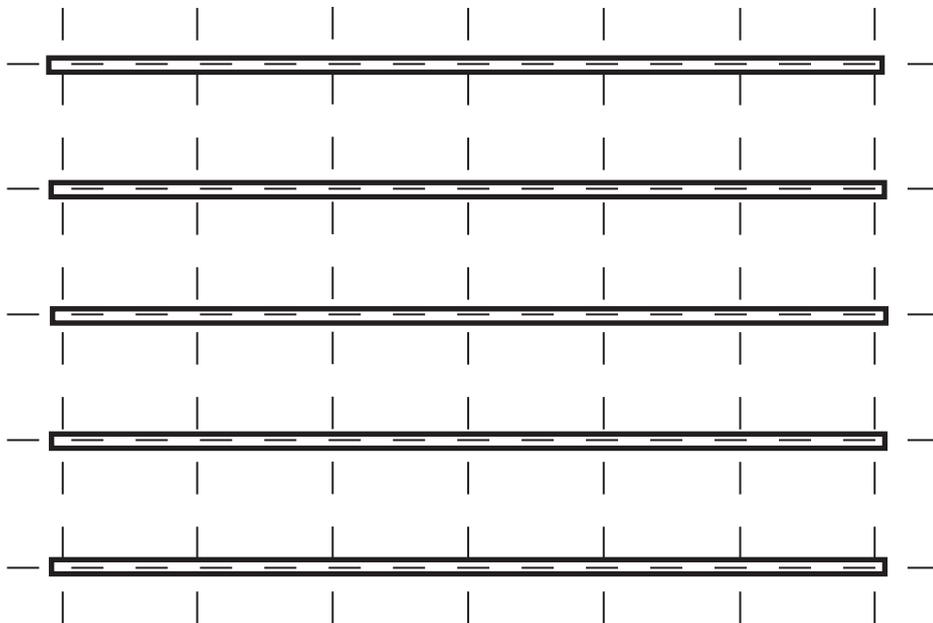


Fig. 33 - Esquema sistema estructural 2 madera contralaminada. Elaboración por el autor.

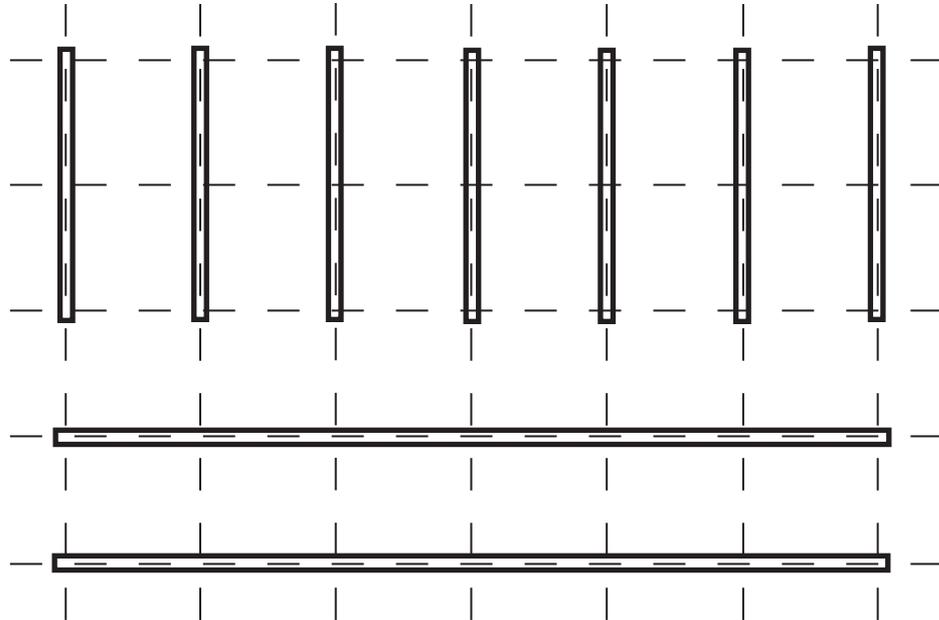


Fig. 34 - Esquema sistema estructural 3 madera contralaminada. Elaboración por el autor.

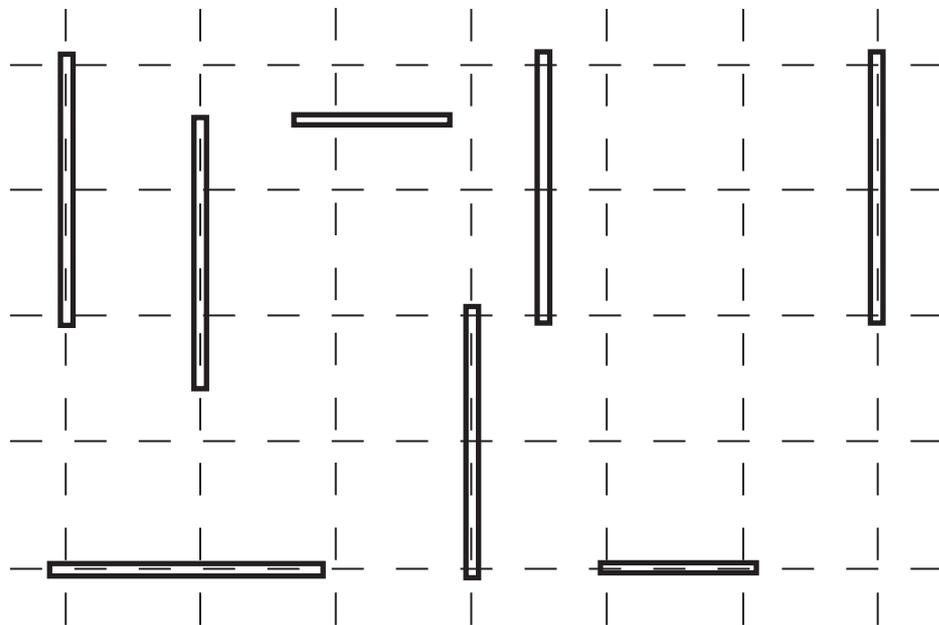


Fig. 35 - Esquema sistema estructural 4 madera contralaminada. Elaboración por el autor.

La variante quattro della presente ricerca ci ricorda nel pensiero il Museo dell'arte a Bregenz progettato dal architetto Peter Zumthor e costruito nel 1997. In questo edificio, la struttura minimalista si pone come una scatola luminosa che assorbe e riflette la luce filtrata attraverso la facciata e l'intero edificio. Il vetro traslucido s'illumina, esternamente dal sole e dall'interno mediante luce artificiale, diventando una parte dinamica della costruzione, in quanto reagisce diversamente secondo la luce, l'ora del giorno, il clima e il contesto che lo circonda. La luce viene catturata dalla facciata in vetro filtrata attraverso una macchina fotografica che cattura e distribuisce attraverso gli spazi della galleria. La fotocamera crea condizioni atmosferiche entro spazi della galleria che hanno una relazione condizionale con l'esterno, e viceversa.

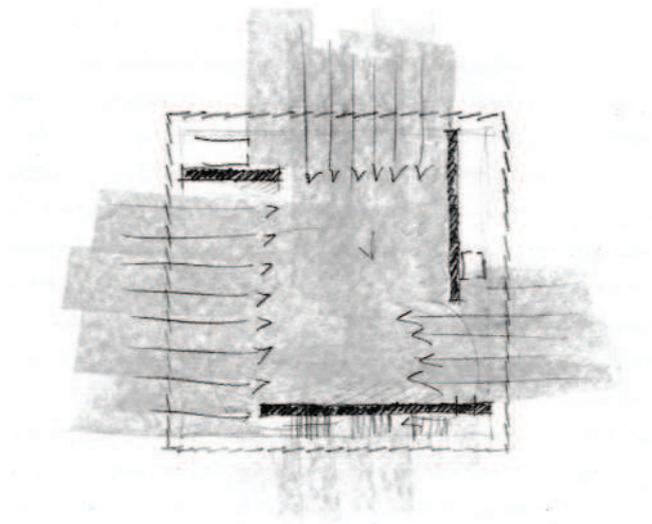


Fig. 36 - Boceto de Museo del Arte de Bregenz. Peter Zumthor.

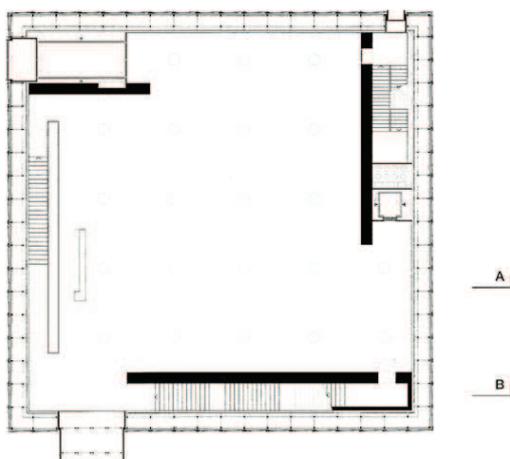


Fig. 37 - Planta baja de Museo del Arte de Bregenz. Peter Zumthor.



Fig. 38 - Exterior del Museo del Arte de Bregenz. Peter Zumthor.



Fig. 39 - Interior del Museo del Arte de Bregenz. Peter Zumthor.



**2. OBJETIVOS Y
METODOLOGÍA DE LA TESIS**



Los objetivos de la presente tesis doctoral, así como el propio cuerpo de la misma, vienen concatenados y dependientes del inmediato anterior.

El objetivo principal será la mitigación de la energía estructural embebida y emisiones de CO₂ a la atmósfera en edificación. Tras incumplir continuamente el protocolo de Kyoto la mayoría de gobiernos de los países industrializados, y todavía hoy con una política energética sostenible escasa, surge la necesidad de repensar los modelos constructivos actuales y de confiar en las posibilidades que la Naturaleza nos pone en nuestra mano. No basta ya con ser eficaz, es necesario ser eficiente.

En el caso de la madera, desde su nacimiento como material compuesto, han sido necesarios varios siglos para alcanzar un producto transformado capaz de romper su ortotropía intrínseca. Una vez caracterizada la madera contralaminada y experimentada en estos últimos años, en plena expansión de uso, con una norma armonizada europea pendiente de aprobación, parece ser el momento de realizar una aportación a la comunidad científica y de este modo intensificar el uso de la misma y obtener una propuesta de un uso masivo de la madera contralaminada en el sector edificación.

Su viabilidad y promoción del uso, pasa por una modelización exacta de su comportamiento estructural para, de ese modo, poder maximizar sus posibilidades y minimizar un cálculo a priori desproporcionado en la mayoría de las ocasiones. El modelo de elementos finitos que ensambla las diferentes capas perpendiculares entre sí, permite realizar un análisis comparativo con ensayos de laboratorio. Para un material con un comportamiento viscoelástico en el tiempo y en la duración de la carga introducida, resulta el estudio pormenorizado del régimen no lineal el que obtiene mejores resultados.

Obtenido el modelo de comportamiento estructural, el siguiente objetivo es la comparación, utilizando dos modelos de vivienda como muestra y que aglutinan gran parte del parque inmobiliario, de los dos sistemas estructurales mayormente utilizados, con la madera contralaminada. Ninguna moneda de cambio mejor que la energía para su comparativa. Mediante el método del análisis de ciclo de vida, únicamente aplicado a los capítulos de estructura y cerramientos, por tener la madera contralaminada un comportamiento bidimensional en relación a los sistemas de barra convencionales, es posible cuantificar energéticamente el proceso.

Es pues la sostenibilidad una obligación para cualquier proyectista. Para un sector edificación, que genera un elevado porcentaje de emisiones brutas al medio ambiente, resulta necesaria la averiguación del sistema mas eficiente. Lo será aquel que cumpliendo con la reglamentación actual, demanda menor cantidad de energía y produce, por ende, menor número de emisiones de gases de efecto invernadero.

Cumplidos los dos objetivos iniciales y demostrada la eficiencia estructural de la madera contralaminada, en términos de energía, surge la duda sobre su uso masivo en edificación. En una nación como España, donde el avance de la desertificación es inminente, la opinión generalizada sobre una afirmación de este tipo, debe ser respaldada y validada científicamente.

Un gran número de variables constituyen el problema sobre un suministro continuo de los bosques españoles para dar servicio a un sector que demanda, aunque en menor medida durante los próximos años, grandes cantidades de madera.

Para la resolución del problema de un modo riguroso y evitar cálculos a priori del fenómeno, se ha desarrollado un modelo matemático capaz de proyectar un conjunto de ocho escenarios posibles, modificando principalmente variables como producción forestal, tasa de corta, construcción y demolición de viviendas, para un periodo de cuarenta años.

La principal ventaja del modelo es su fácil exportación a cualquier otra nación con la simple sustitución de los datos introducidos. La comunidad científica ha asumido dicha investigación en el momento de defensa de la presente tesis doctoral, mediante la publicación de los resultados de esta investigación en la revista *Clean Technologies and Environmental Policy* con DOI 10.1007/s10098-014-0738-3.

Evolutivamente cumplidos los objetivos de esta tesis, a medida que se han desarrollado las investigaciones, han surgido nuevos campos pendientes de desarrollo, los cuales serán tratados debidamente en su apartado correspondiente.





3. ANTECEDENTES





3.1. Elasticidad en los materiales ortótropos





3.1.1. Introducción al análisis de la madera como material ortótropo

La madera puede considerarse como un material ortótropo. De su estructura anatómica formada por tubos de fibras de madera orientados en la dirección longitudinal y unidos en la dirección radial por otro conjunto de fibras llamados radios leñosos, podemos identificar las tres direcciones de ortotropía, que componen la geometría interna del material y son (Argüelles et al., 2013):

- la longitudinal o paralela a las fibras,
- la radial o perpendicular a los anillos de crecimiento, y
- la tangencial tangente a dichos anillos y perpendicular a las otras dos.

En un cuerpo isótropo, las relaciones entre las tensiones y deformaciones unitarias vienen dadas al conocer las constantes elásticas del material, a saber:

- E , siendo el módulo de elasticidad longitudinal
- G , siendo el módulo de elasticidad transversal
- ν , siendo el coeficiente de Poisson

Quedando reducidas a dos, por la relación:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

En un sólido ortótropo como la madera, necesitamos conocer al menos doce constantes elásticas, para poder aplicar la relación tensión deformación unitaria. Necesitamos saber pues (Argüelles et al., 2013):

- tres módulos de elasticidad longitudinal: E_L , E_R , E_T
- tres módulos de elasticidad trasnversal: G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}
- seis coeficientes de Poisson: ν_{LR} , ν_{RL} , ν_{LT} , ν_{TL} , ν_{RT} , ν_{TR}

Según la reciprocidad de recorridos, podemos establecer la relación:

$$\frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}; \frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_L}; \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}$$

Que nos permite simplificar el número de incógnitas a nueve.

Las deformaciones unitarias longitudinales, ϵ_i , podemos obtenerlas a partir de las tensiones en las tres direcciones de ortotropía, a través de las ecuaciones:

$$\epsilon_R = \frac{\sigma_R}{E_R} - \frac{V_{TR}}{E_T} \sigma_T - \frac{V_{LR}}{E_L} \sigma_L$$

$$\epsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_T} - \frac{V_{TR}}{E_R} \sigma_R - \frac{V_{LT}}{E_L} \sigma_L$$

$$\epsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} - \frac{V_{RL}}{E_R} \sigma_R - \frac{V_{LT}}{E_T} \sigma_T$$

Por otro lado, las distorsiones angulares quedarían del siguiente modo:

$$\gamma_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{G_{LT}}$$

$$\gamma_{LR} = \frac{\tau_{LR}}{G_{LR}}$$

$$\gamma_{RT} = \frac{\tau_{RT}}{G_{RT}}$$

Agrupando este conjunto de ecuaciones, obtenemos la ley generalizada de Hooke para materiales ortótropos, que sigue del siguiente modo:

$$\begin{pmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_T \\ \epsilon_R \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \tau_{TL} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{RT} \end{pmatrix}$$

Esta ecuación suele representarse por la expresión

$$\{\varepsilon\} = |f| \cdot \{\sigma\}$$

siendo $|f|$ la matriz de flexibilidad.

Si partimos en cambio del estado de deformaciones, tenemos la expresión

$$\{\sigma\} = |k| \cdot \{\varepsilon\}$$

donde $|k|$ es la matriz de rigidez del material, siendo la inversa de la matriz de flexibilidad.

3.1.2. Análisis plano del estado tensional de la madera

Si consideramos únicamente un estado bidimensional, donde los únicos ejes actuantes son los ejes L y T, y el cuerpo estudiado es un cuerpo delgado que se encuentra en el plano L-T donde podemos modelar el sistema como un compuesto ortotrópico de esfuerzo plano. (Ver figuras).

En el caso de la madera contralaminada, la combinación de un conjunto de capas bajo diferentes orientaciones de la fibra genera un material compuesto. Si analizamos cada una de las capas o láminas por separado obtenemos la constatación que el modulo de rigidez paralelo a las fibras, o longitudinal, es mucho mayor que el tangencial, o transversal. Es decir,

$$E_R > E_T$$

En esfuerzo plano, todos los esfuerzos y desplazamientos se consideran promediados a través del espesor, y son, en consecuencia, sólo funciones de L y T. La carga se considera que actúa en el plano L-T. De este modo, las ecuaciones anteriores sobre elongaciones unitarias las podemos simplificar en:

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} - \frac{V_{LT}}{E_T} \sigma_T$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_T} - \frac{V_{LT}}{E_L} \sigma_L$$

Del mismo modo, la distorsión angular se obtiene con la fórmula:

$$\gamma_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{G_{LT}}$$

Dichas ecuaciones pueden representarse mediante la siguiente expresión matricial:

$$\begin{bmatrix} \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{TL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_T \cdot \nu_{LT}}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} & \frac{E_T}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} & 0 \\ \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} & \frac{E_L \cdot \nu_{TL}}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{TL} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \gamma_{TL} \end{bmatrix}$$

Dicha expresión se nombrará como D_m , donde el índice m indica que está referida a los ejes del material.

Cuando una placa ortotrópica, es decir, cada una de las láminas, está cargada en un plano paralelo a sus ejes materiales, sólo se originan deformaciones unitarias normales. En cambio, si las sollicitaciones son perpendiculares al plano material, tendremos deformaciones unitarias normales y por cortante.

Para la resolución de los conflictos de orientación derivados del desacoplamiento entre los ejes globales X, Y, y los ejes locales L y T, procedemos a considerar un ángulo θ contrario al sentido horario de las manecillas del reloj, según la figura siguiente.

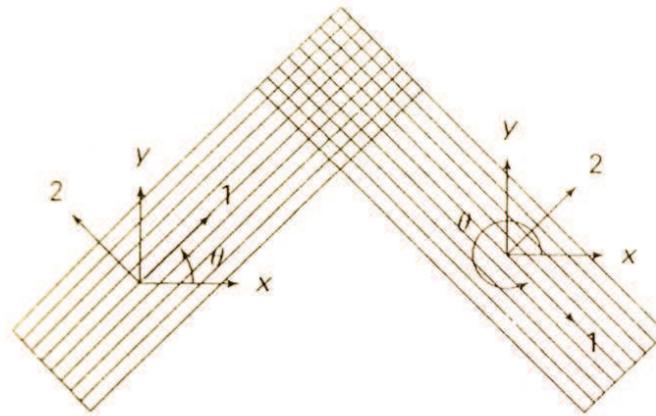


Fig. 40 - Orientación de los ejes del material con respecto a los ejes globales.

(B.D. Agarwal, L.J. Broutman 1980)

Generamos pues la matriz de transformación:

$$T = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix}$$

La relación entre las tensiones y deformaciones unitarias del sistema global y local son las siguientes:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{TL} \end{Bmatrix} = T \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{TL} \end{Bmatrix} = T \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

Obtenidas dichas relaciones podemos organizar la matriz D, que relaciona la tensión y deformación en el sistema global según la siguiente expresión:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

Las matrices D y D_m pueden relacionarse según el siguiente conjunto de ecuaciones (B.D. Agarwal, L.J. Broutman 1980):

$$D_{11} = D_{11}^m \cos^4 \theta + 2(D_{12}^m + 2D_{33}^m) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + D_{22}^m \sin^4 \theta$$

$$D_{12} = (D_{11}^m + D_{22}^m - 4D_{33}^m) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + D_{12}^m (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

$$D_{13} = (D_{11}^m - D_{12}^m - 2D_{33}^m) \sin \theta \cos^3 \theta + (D_{12}^m - D_{22}^m + 2D_{33}^m) \sin^3 \theta \cos \theta$$

$$D_{22} = D_{11}^m \sin^4 \theta + 2(D_{12}^m + 2D_{33}^m) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + D_{22}^m \cos^4 \theta$$

$$D_{23} = (D_{11}^m - D_{12}^m - 2D_{33}^m) \sin^2 \theta \cos \theta + (D_{12}^m - D_{22}^m + 2D_{33}^m) \sin \theta \cos^3 \theta$$

$$D_{33} = (D_{11}^m - D_{22}^m - 2D_{12}^m - 2D_{33}^m) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + D_{33}^m (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

Dentro de cada elemento finito, el ángulo θ se supone constante, si bien dicha angulación puede variar de uno a otro elemento. De este modo podemos simular un comportamiento más ajustado a la realidad del material. De este modo, tras obtener los esfuerzos en el sistema global de coordenadas, mediante las ecuaciones:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{TL} \end{Bmatrix} = T \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{TL} \end{Bmatrix} = T \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

Podemos obtener los esfuerzos en el sistema local de coordenadas del material, para posteriormente calcular el estado tensional de un material según el criterio de rotura que definamos.

3.1.3. Obtención de las constantes elásticas de la madera

Para la obtención del módulo de elasticidad longitudinal de la madera, E_L , se suelen realizar ensayos de compresión simple sobre probetas pequeñas y libres de defectos. Los ensayos para la obtención de los módulos de elasticidad radial y tangencial, E_R y E_T , no son tan abundantes.

Según Daniel Guitard (Guitard 1987), a pesar de variar de especie a especie, y según el contenido de humedad de la pieza, podemos establecer la siguiente ecuación para los ejes principales de ortotropía para maderas de conífera, que simplifica enormemente los cálculos. Mediante una relación continua entre las constantes elásticas de la madera para las tres direcciones principales se puede plantear la expresión:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{RT} \end{pmatrix} = \frac{1}{E_L} \begin{pmatrix} -13 & -6,55 & -0,39 & 0 & 0 & 0 \\ 6,55 & 21 & -0,43 & 0 & 0 & 0 \\ -0,39 & -0,43 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17,25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 14,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 153,50 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{TL} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{RT} \end{pmatrix}$$

Mediante la utilización de las constantes elásticas anteriormente descritas se pueden generar modelos numéricos de elementos finitos que simulen el comportamiento y permitan realizar análisis del fallo del material mediante criterios de rotura (Smith et al. 2003, Cabrero et al. 2009). Pero para obtenerlas resulta necesario unificar los criterios sobre las muestras utilizadas. Algunos investigadores apuntan hacia una única probeta para que los resultados sean coherentes (Majano-Majano et al. 2012).

3.1.4. Formulación de la rigidez en el elementos finitos superficiales

Para obtener la matriz de rigidez local de los elementos se utiliza la formulación isoparamétrica. El proceso que se sigue es el siguiente:

1. Definición del campo de desplazamientos. Obteniendo las funciones de interpolación.
2. Campo de deformaciones. Que relacionan los movimientos del continuo mecánico con las deformaciones producidas.
3. Campo de tensiones. Relación de las tensiones con las deformaciones a través de la matriz constitutiva del material, en este caso de las relaciones de la teoría de la elasticidad.
4. Fuerzas nodales equivalentes.
5. Aplicación del Principio de Trabajos virtuales al equilibrio de las fuerzas internas y externas sobre el elemento.

Obtención de las funciones de forma N del elemento.

Estas funciones son expresiones de interpolación entre los valores nodales y sus correspondientes valores en cualquier punto del elemento. Hay tantas funciones de forma como nudos tenga el elemento.

En la formulación isoparamétrica se utilizan las mismas funciones de forma para interpolar la geometría y los desplazamientos.

Así, para un elemento de n nudos, la interpolación geométrica se expresa como

$$x = \sum_{i=1}^n N_i(\alpha, \beta, \gamma) \cdot x_i, y = \sum_{i=1}^n N_i(\alpha, \beta, \gamma) \cdot y_i, z = \sum_{i=1}^n N_i(\alpha, \beta, \gamma) \cdot z_i$$

siendo

$N_i(\alpha, \beta, \gamma)$ las funciones de forma del elemento, expresadas en función de las coordenadas naturales.

La ecuación anterior relaciona las coordenadas cartesianas de un punto del elemento (x,y,z) con las naturales (α, β, γ) ; siendo (x_i, y_i, z_i) las coordenadas cartesianas del nudo i .

Con las funciones de forma se realiza la interpolación para calcular los movimientos en cualquier punto interior del elemento que relacionan el movimiento \vec{u} de un punto cualquiera del interior del elemento con los movimientos $\vec{\delta}$ de los nodos extremos de dicho elemento.

$$\vec{u} = \vec{N} \vec{\delta} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \delta_i$$

Definición del Campo de deformaciones.

Se calculan las deformaciones unitarias del material en función de los movimientos de cualquier punto del elemento. Este cálculo se realiza operando sobre el vector de movimientos de un punto. Este operador \vec{L} , en general, es una matriz en derivadas parciales sobre los movimientos \vec{u} .

$$\vec{\varepsilon} = \vec{L} \vec{u} = \sum_{i=1}^n B_i \delta_i = \vec{B} \vec{\delta}$$

Siendo \vec{B}_i la matriz de deformación, que se halla operando sobre las funciones de forma:

$$\vec{B}_i = \vec{L} N_i$$

Definición del Campo de tensiones

Expresión de la relación entre tensiones y deformaciones a través de la matriz constitutiva D , que se particularizará para cada tipo de elemento, que puede ser la matriz de elasticidad o de flexión:

Admitiendo un comportamiento elástico lineal del tipo más general, la relación entre tensiones y deformaciones es lineal y tiene la forma:

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0$$

siendo,

D la matriz de elasticidad,

ε_0 y σ_0 las deformaciones y tensiones iniciales, si existen.

Relacionando las deformaciones con los desplazamientos a través de la matriz de deformación se obtiene:

$$\sigma = D\varepsilon = DB\delta$$

Fuerzas nodales equivalentes

Se definen las fuerzas que actúan en los nodos, siendo estáticamente equivalentes a las fuerzas que actúan aplicadas sobre el elemento.

$$q^e = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_g \end{Bmatrix}$$

Estas fuerzas expresadas en forma vectorial, deben tener el mismo número de componentes (g) que el desplazamiento nodal correspondiente, δ_i , es decir el mismo número de componentes que los grados de libertad del nudo.

Las fuerzas distribuidas **b** son las que actúan por unidad de volumen, en las direcciones de los grados de libertad de los nudos correspondientes, como es la acción del peso propio del elemento.

$$b^e = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_g \end{Bmatrix}$$

Aplicación del principio de los trabajos virtuales

Considerando que el elemento está en equilibrio sometido a un sistema de fuerzas externas \mathbf{q}_e aplicadas a los nudos, a las fuerzas distribuidas de volumen \mathbf{b}_e y a las tensiones internas $\boldsymbol{\sigma}$, se aplica un desplazamiento virtual infinitesimal $\boldsymbol{\delta}^*$ en los nudos, compatible con las condiciones de contorno.

Estos desplazamientos nodales $\boldsymbol{\delta}^*$ dan lugar a unos desplazamientos virtuales en los puntos interiores del elemento \mathbf{u}^* que originan unas deformaciones virtuales $\boldsymbol{\varepsilon}^*$.

Según el teorema de los trabajos virtuales ha de ser nula la suma del trabajo W_e que realizan las fuerzas externas durante los desplazamientos virtuales $\boldsymbol{\delta}^*$ y \mathbf{u}^* y del trabajo W_i que realizan las fuerzas internas debidas a las tensiones $\boldsymbol{\sigma}$ durante las deformaciones virtuales $\boldsymbol{\varepsilon}^*$.

Siendo,

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{N} \cdot \boldsymbol{\delta}^* \quad \text{y} \quad \boldsymbol{\varepsilon}^* = \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\delta}^*$$

El trabajo externo es,

$$W_e = \{\boldsymbol{\delta}^*\}^T \cdot \mathbf{q}^e + \{\mathbf{u}^*\}^T \cdot \mathbf{b}^e$$

$$W_e = \{\boldsymbol{\delta}^*\}^T \cdot \mathbf{q}^e + \{\mathbf{N} \cdot \boldsymbol{\delta}^*\}^T \cdot \mathbf{b}^e$$

El trabajo interno por unidad de volumen es,

$$W_i = \{\boldsymbol{\varepsilon}^*\}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} = \{\mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\delta}^*\}^T \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

Según las propiedades del álgebra matricial se puede escribir,

$$\{\mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\delta}^*\}^T = \boldsymbol{\delta}^{*T} \cdot \mathbf{B}^T$$

Aplicando esta equivalencia en la ecuación que expresa el trabajo interno,

$$W_i = \delta^{*T} \cdot B^T \cdot \sigma$$

Para la ecuación que expresa el trabajo externo, se aplica la misma transformación y queda para el trabajo externo la siguiente expresión.

$$W_e = \{\delta^*\}^T \cdot q^e + \delta^{*T} \cdot N^T \cdot b^e$$

Igualando las expresiones de los trabajos interno y externo y extendiendo el trabajo a todo el volumen del elemento mediante integración queda la expresión,

$$\delta^{*T} \cdot q^e + \delta^{*T} \int_{vol} N^T b^e \cdot dV = \delta^{*T} \int_{vol} B^T \cdot \sigma \cdot dV$$

Esta relación es válida con absoluta generalidad para cualquier relación entre tensiones y deformaciones. En el caso de la ley lineal expresada en la definición del campo de tensiones, se obtiene.

$$\sigma = D \cdot B \cdot \delta - D \cdot \varepsilon_0 + \sigma_0$$

resultando de todo ello la siguiente expresión,

$$\delta^{*T} \cdot q^e + \delta^{*T} \cdot \int_{vol} N^T b^e \cdot dV = \delta^{*T} \left[\int_{vol} B^T D B \cdot \delta \cdot dV - \int_{vol} B^T D \varepsilon_0 \cdot dV + \int_{vol} B^T \sigma_0 \cdot dV \right]$$

Esta expresión se puede formular de modo que manifieste su relación con el cálculo matricial clásico:

$$f^e = k^e \cdot \delta^e$$

Entonces se tiene que el vector de cargas queda formado por

$$f^e = q^e + \int_{vol} N^T b^e \cdot dV + \int_{vol} B^T D \varepsilon_0 \cdot dV - \int_{vol} B^T \sigma_0 \cdot dV$$

Y la matriz de rigidez del elemento es:

$$k^e = \int_{vol} B^T DB \cdot dV$$

Esta expresión, general para todos los tipos de elementos, se particulariza para cada uno de ellos. La evaluación de las integrales de volumen sobre el elemento se resuelven por integración numérica utilizando la cuadratura de Gauss.

Para la mayoría de elementos no es posible obtener expresiones explícitas de estas integrales, por lo que el recurso a su cálculo numérico es obligado.

Particularizando para elementos superficiales bidimensionales se puede escribir la matriz de rigidez del elemento como sucede,

$$k^e = \int_{Area} B^T DB \cdot t \cdot dA$$



3.2. Formulación actual del comportamiento ortotrópico de paneles CLT



Las losas de madera contralaminada se usan en edificación generalmente con una dirección predominante, por lo que los modelos de computadora basados en una dimensión son suficientes. Pero en la realidad, hay situaciones (apoyos puntuales, apoyo de muro, conexiones, vuelos) que requieren un estudio de dos dimensiones de las losas.

3.2.1. Métodos de cálculo

Métodos de cálculo 1-D

Podemos clasificar los métodos de cálculo de una dimensión dependiendo de la relación entre el largo del panel y su canto. Siendo L el largo y H el canto del panel CLT tenemos:

Relación $L/H < 15$

–**Solución analítica** para losas flexibles contralaminadas (Guggenberger & Moosbrugger, 2006)

Relación $L/H > 15$

–**Método de analogía de cortante** – Norma DIN 1052 (Kreuzinger, 1999)
–**Método gamma modificado** – Como junta articulada flexible –Norma DIN 1052 y EN-1995-1-1 (Blab & Görlacher, 2003)
–**Teoría de vigas de Timoshenko**, que simula una viga flexible con cortante transversal.

Éstos tres últimos difieren de la solución exacta de la viga multicapa flexible cargada a cortante, pero su aplicación difiere en muy poca medida de la solución exacta, especialmente en vigas de un solo tramo.

Como excepción está la viga de Euler-Bernoulli que es rígida a cortante.

Se cumple asimismo la hipótesis de Bernoulli de conservación de caras planas en deformación. Por tanto, la distribución de tensiones a flexión permanece lineal. En este método, los resultados varían mucho (entre 0.45 y 2.10) en función de la proporción t_{90}/t_0 , siendo estas variables los espesores de las laminas perpendiculares y paralelas respectivamente. Para losas de 3 laminas existe una mayor desviación, en torno a un 9% para $L/H = 15$.

Métodos de cálculo 2-D

Generalmente, como se ha comentado en el apartado anterior, las placas de CLT trabajan en una dirección. En algunos casos, los elementos de forjado están sometidos a tensiones bi-axiales (por distribución de apoyos puntuales). Este comportamiento en 2 dimensiones puede ser verificado según la actual teoría de placas:

–**Kirchhof** y teorías derivadas – Para losas sin flexibilidad a cortante

–**Reissner-Midlin** – Para losas en general, si hay que incluir los efectos del cortante

3.2.2. Comprobación de estados límite últimos

A tenor del Eurocódigo 5 (Norma UNE 1995), la comprobación de los estados límite últimos para losas de madera contralaminada deberá realizarse bajo diferentes criterios mecánicos, cuyo procedimiento se detalla a continuación para cada uno de ellos.

Comprobación de flexión

Se deberá cumplir en cada punto de la estructura

$$\sigma_{edge,d} \leq f_{m,CLT,d}$$

Tensión máxima en z:

$$\sigma(z) = \frac{M_y}{K_{CLT}} \cdot z \cdot E(z)$$

Para una losa de 5 capas, la tensión media en extremo de placa:

$$\sigma_{m,i} = \sigma_{5,edge,d} = \frac{M_{max,d}}{K_{CLT}} \cdot \frac{t_{CLT}}{2} \cdot E_{i=5}$$

Siendo la rigidez a flexión de la sección contralaminada

$$K_{CLT} = \sum_{i=1}^n (J_i \cdot E_i) + \sum_{i=1}^n (A_i \cdot e_i^2 \cdot E_i)$$

Siendo,

J_i – momento de inercia en cada capa en referencia al eje neutro de cada capa

E_i – modulo de Young de cada capa

e_i – Distancia desde eje neutro de cada lamina al eje neutro del tablero

Según ensayos realizados, se obtiene que:

$K_{c,90,CLT}$ con carga central = 1,9

$K_{c,90,CLT}$ con carga en extremo o esquina = 1,4

Es muy importante el cambio de rigidez en las láminas perpendiculares y su modulo de elasticidad. El ratio debe ser de $E_{\parallel}/E_{\perp} = 30$ según la norma EN 338

Resistencia característica

La resistencia característica a emplear en el calculo de losas CLT se rige bajo la siguiente fórmula:

$$f_{m,CLT,k} = a_{CLT} \cdot f_{t,0,l,k}^{0,8}$$

Siendo,

a_{CLT} el factor de contralaminada, dependiente del coeficiente de variación, el efecto de laminación, el efecto del sistema, el efecto del tamaño, y el efecto del ensamblado

$f_{t,0,l,k}$ la resistencia a tracción paralela a la fibra de cada lamina

Resistencia de cálculo

La resistencia de cálculo a emplear en el calculo de losas CLT podemos obtenerla mediante la formula:

$$f_{m,CLT,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{m,CLT,k}}{\gamma_M}$$

O bien mediante la fórmula:

$$f_{m,CLT,d} = k_1 \cdot \frac{K_{mod} \cdot f_{m,GLT,k}}{\gamma_M}$$

Siendo k_1 el factor de resistencia del sistema, calculable según la ecuación:

$$k_1 = \min \left\{ \frac{1.1}{1 + 0.025n}, \text{ para } n > 1 \right.$$

La deformación por cortante debe ser tenida en cuenta, debiendo ser añadida a la deformación por flexión en cada punto.

Compresión perpendicular a la fibra

Este aspecto resulta decisivo en el cálculo de losas CLT. Las actuales investigaciones versan sobre el establecimiento de la mejora que supone respecto de la madera laminada GLT. En la bibliografía encontramos tres tesis doctorales relacionadas con el cálculo de este variable. (Halili, 2008)(Serrano, 2010)(Salzmann, 2010).

En las tres investigaciones mencionadas, se realizan ensayos en probeta cúbica (16x16cm y 20x20cm) y placa. Se comprueba el aplastamiento de la madera y punzonamiento. Se realiza en modo similar a la GLT (según EN 408). Como conclusiones comunes se pueden resumir las dos siguientes:

- 1.- Se observa que a partir de $0.4f_{c,90,CLT}$ inicia periodo de fluencia y pierde rigidez.
- 2.- El comportamiento de los paneles CLT bajo presión perpendicular a la fibra es ductil y no lineal.

Respectivamente, según Y. Halili existe una correlación entre resistencia perpendicular y rigidez. La comparativa entre GLT y CLT esta basada en un comportamiento del material lineal, elástico y ortotrópico. Un incremento en la rigidez puede ser interpretado como un incremento en la resistencia.

Por su parte, Al-Douri H.K.H. (Al-Douri, 2009) y E. Serrano (Serrano, 2010) realizan investigaciones sobre la resistencia a compresión, con probetas de 3 laminas, espesor 120mm y superficie de 200x200mm. Los resultados obtienen un incremento del 27% en resistencia a compresión perpendicular a la fibra y del 50% en el modulo de elasticidad perpendicular $E_{c,90,CLT,m}$ respecto de GLT.

La formulación para el cálculo de la tensión perpendicular a la fibra en CLT es:

$$\sigma_{c,CLT,90,d} = \frac{F_d}{A_{c,90}}$$

Siendo $A_{c,90}$ la superficie de apoyo, bien sea puntual que en muro

En la madera contralaminada, las laminas cruzadas generan un efecto bloqueo del efecto Poisson, obteniendo una reducción de las deformaciones perpendiculares a la fibra, mayor rigidez, menor probabilidad de fallo y mayor capacidad de carga perpendicular a la fibra. Proporciona en definitiva resultados mejores que GLT. Se obtienen la siguiente colección de valores:

$$f_{c,GLT,90,k} = 2,50 \text{ MPa, según norma EN 14080}$$

$$f_{c,CLT,90,k} = 3,00 \text{ MPa, según universidad de Graz}$$

$$K_{c,GLT,90} = 1,50 \text{ MPa}$$

$$K_{c,CLT,90} = 2,00 \text{ MPa}$$

$$f_{c,GLT,90,k} \cdot K_{c,GLT,90} = 3,75 \text{ MPa}$$

$$f_{c,CLT,90,k} \cdot K_{c,CLT,90} = 6,00 \text{ MPa}$$

De este modo, la madera CLT se sitúa con una resistencia a compresión perpendicular a la fibra entre un 20% y un 60% más que GLT. Salzmann (Salzmann, 2010) establece que para una resistencia $f_{c,90,CLT,k} = 2.85 \text{ MPa}$, se obtienen los siguientes valores de,

$$K_{c,90,CLT} \begin{cases} 1.8 \text{ para carga centrada} \\ 1.5 \text{ para carga lateral} \\ 1.4 \text{ para carga en extremo} \end{cases}$$

Para concluir este apartado, una formulación elasto-plástica se introduce adicionalmente paralela a la carga y perpendicular al plano (Simo & Huges, 1998). Se limita el periodo plástico perpendicular a la fibra al 1%. Esta investigación mantiene una fluencia en el material y una limitación de la plasticidad, valores propios del cálculo con hormigón armado. Parece lógico pensar que la madera tenga un comportamiento en el tiempo similar.

Resistencia a cortante

Dependiendo del esfuerzo aplicado a las placas objeto de ensayo, existen 3 tensiones en el plano identificadas.

1.- *Bordes unidos*– La tensión de cortante se aplica del mismo modo en ambos lados de la muestra. La tensión nominal en el plano obtenida se muestra con la fórmula

$$\tau_0 = \frac{n_{xy}}{t}$$

siendo

t el espesor sustitutivo para cada *SEVR* (pieza mínima de estudio). Depende de cada panel.

2.- *Bordes sin unión*– La tensión de cortante se aplica en sentido contrario en cada lado de la muestra. La tensión en la sección transversal es

$$\tau_v = 2 \cdot \tau_0$$

3.- *Bordes quebrados*– Tensión debida al momento torsor en cada capa encolada intermedia.

$$\tau_T = 3 \cdot \tau_0 \cdot \frac{t}{a}$$

siendo

a , la altura de la muestra

Según investigaciones realizadas por Gerhard Schickhofer, para determinar la tensión de cortante en las dos direcciones, se pueden seguir dos metodologías:

- 1.- Según R. Jobstl, CIB-W18:2008
- 2.- Según EN 408 y EN 789

Siendo esta última más recomendable para el cálculo de la resistencia a cortante, la cual obtiene un valor a cortante:

$$f_{v,CLT,k} \geq 5.2 \text{ MPa}$$

Rigidez a cortante

Según investigaciones recientes (Schickhofer & Thiel, 2010), la rigidez a cortante de una viga compuesta sin pandeo del área perpendicular, S_{ges} sigue la ecuación:

$$S_{CLT} = S_{ges} \cdot K$$
$$S_{ges} = \sum (G_i \cdot b_i \cdot t_i) = \sum G_i \cdot A_i$$

Siendo:

G_i el módulo de cortante de cada capa

t_i el espesor de cada capa

b_i el ancho de cada capa

K el coeficiente corrector de cortante, y se puede calcular bajo la expresión,

$$K = \frac{1}{S_{ges} \cdot \frac{1}{K_{CLT}^2} \cdot \int_h \frac{S^2(z, E(z))}{G(z) \cdot b(z)} dz}$$

Siendo:

$S^2(z, E(z))$, segundo momento estático del área dependiendo de la coordenada z

$G(z)$, módulo de cortante en z

$b(z)$, espesor de la sección en z

Debido a la influencia del cortante de las laminas perpendiculares, se puede estimar para la producción actual de paneles un valor medio de $K=0,25$

Como última consideración, para las laminas perpendiculares, el módulo de cortante perpendicular a la fibra (rolling shear modulus) $G_{90,90}$ se debe utilizar en lugar de $G_{0,90}$.

Cortante en las laminas perpendiculares (rolling shear)

Además de las comprobaciones a cortante propias de la madera laminada, hay que comprobar el cortante en láminas perpendiculares, denominado rolling shear. Resulta actualmente uno de los campos de investigación con mayor profusión. A tenor de la publicación anterior (Schickhofer & Thiel, 2010) se incorporan las siguientes ecuaciones:

$$\tau(z_0) = \frac{V_z \cdot \int_{A_0} E(z) \cdot z \cdot dA}{K_{CLT} \cdot b(z_0)}$$

$$\tau_d < f_{v,CLT,d}$$

$$\tau_{r,d} < f_{r,CLT,d}$$

Siendo,

τ_d el cortante en las laminas paralelas

$\tau_{r,d}$ el cortante en las laminas perpendiculares (rolling shear)

Resistencia a torsión

Se ha obtenido la tensión de torsión en la zona intermedia de encolado, (Jeitler, 2004):

$$\tau_{T,max} = \frac{M_T}{J_p} \cdot \frac{1}{2} \cdot a = \frac{3 \cdot M_T}{a^3}$$

Siendo,

M_T el momento torsor

a la dimension de *ELP*(pieza mínima de estudio)

$$J_p = a^4/6$$

Se puede considerar un valor aceptado $f_{v,CLT,k} = 2,50$ MPa

En tableros con pequeña sección, el utilizar tablas con veta de canto ofrece resistencias mayores.

3.2.3 Calculo de la capacidad de carga

Reglas de flujo

Según investigaciones realizadas (Schickhofer et al. 2011) la regla de flujo para el comportamiento uniaxial del la madera contralaminada es:

$$f(\sigma, q) = |\sigma| + q_{iso} - f_y = 0$$

Siendo,

- $f(\sigma, q)$ la ecuación regla de flujo
- $|\sigma|$ el valor absoluto de la tensión
- q_{iso} la tensión isotrópica endurecida
- f_y la resistencia en fluencia

La ley que rige el término de tensiones es la ecuación de la elástica. En cambio, se acepta un componente plástico, ya que $\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$

$$\dot{\sigma} = E \cdot (\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_{pl})$$

$$q_{iso} = -H \cdot \dot{\alpha}$$

Siendo:

H el modulo de endurecimiento lineal

$\dot{\alpha}$ variable, tiene en cuenta el daño interno (energía de disipación) debida al flujo plástico.

Por su parte, cada uno de estos términos:

$$\dot{\varepsilon}_{pl} = \lambda \cdot \frac{\partial f(\sigma, q_{iso})}{\partial \sigma} = \lambda \cdot \text{signo}(\sigma)$$

$$\dot{\alpha} = \lambda \cdot \frac{\partial f(\sigma, q_{iso})}{\partial q} = \lambda$$

Siendo:

λ el parámetro de Lagrange, todavía por resolver

La consecuente extensión al sistema elástico-lineal y ortotrópico en 3 dimensiones debe incluir el comportamiento elasto-plástico en el eje radial. En las investigaciones realizadas se observa un pequeño endurecimiento lineal. El sistema de ecuaciones anterior se combina con los datos de la tesis de Salzmann (Salzmann, 2010), que asume un comportamiento elasto-plástico en la dirección radial.

Los resultados son una tensión de fluencia de 2.10 MPa así como un endurecimiento no lineal que sucede posteriormente, cuando las deformaciones mayores por compresión se han desarrollado. Se asume un valor de $H=0.30$ MPa. Usando todos estos parámetros, en la dirección radial tenemos un comportamiento plástico a partir de deformaciones de 7.5‰, tratándose pues de un plástico perfecto.

Esta aproximación supone el principal comportamiento del material en modelo mecánico. Otro método para calcularlo pasa por usar el Criterio de Hill, es decir, la extensión del criterio de fluencia de Von Mises para materiales ortotrópicos (Mascia & Simoni, 2013), que sigue la siguiente formulación:

$$(G + H) \cdot \sigma_1^2 + (F + H) \cdot \sigma_2^2 + (F + G) \cdot \sigma_3^2 - 2H\sigma_1 \cdot \sigma_2 - 2G\sigma_1 \cdot \sigma_3 - 2F\sigma_2 \cdot \sigma_3 + 2L \cdot \tau_{23}^2 + 2M \cdot \tau_{13}^2 + 2N \cdot \tau_{12}^2 = 1$$

Siendo:

F, G, H, L, M, N los parámetros mecánicos del material

Cuando la ecuación queda igualada al valor 1, se alcanza el límite de fallo en el material. Valores inferiores a uno indican grados de daño inferiores bajo un específico estado de tensión, en las principales direcciones.

3.2.4. Comprobación de estados límite de servicio

Deformaciones

Según el principio de trabajos virtuales, existe una deformación instantánea producida por el momento y el cortante (Schickhofer & Thiel, 2010) cuya expresión figura a continuación. Se produce pues una deformación combinada:

$$w_{ges} = \frac{1}{K_{CLT}} \cdot \int (M \cdot \bar{M}) dx + \frac{1}{S_{CLT}} \int (V \cdot \bar{V}) dx$$

En la deformación a largo plazo, el coeficiente k_{def} se obtiene según la clase de servicio (Jöbstl 2007). Se establecen los siguientes valores de cálculo:

$$k_{def} \begin{cases} \text{clase de servicio 1} = 0.85 \\ \text{clase de servicio 2} = 1.1 \end{cases}$$

Vibraciones

Según la EN 1995-1-1, han de ser verificados cuatro criterios en materia de vibraciones para losas de madera contralaminada. Se describen a continuación.

- 1.- Calcular la frecuencia fundamental. El principal método de cálculo de la frecuencia fundamental considera la deformación basada en la evolución de la frecuencia de Morleigh (Peterssen 2000). Dicha frecuencia deberá ser por lo menos de 8Hz.
- 2.- Criterio de rigidez. Consiste en calcular la flecha máxima instantánea producida por carga puntual de 2KN.
- 3.- Cálculo de la velocidad de vibración.
- 4.- Cálculo de la aceleración de vibración.

Para la madera contralaminada, estas cuatro ecuaciones están adaptadas al comportamiento propio del material. (P. Hamm et al., 2010)

Para la enorme importancia del factor de pandeo para losas horizontales de CLT mirar formulación de Fitz (Fitz, 2008).

3.2.5. Sismo en madera contralaminada

A continuación se exponen las principales teorías en materia de sismo en madera contralaminada.

- 1.- A. Ceccotti. El proyecto SOFIE (Ceccotti 2008) ha supuesto uno de los mayores avances en materia de evaluación del comportamiento sísmico de estructuras íntegramente construidas en madera contralaminada. El proyecto SOFIE somete a prueba un edificio de tres plantas y otro de siete plantas y los compara con los resultados de un programa de simulación. El objetivo de este proyecto fue calcular el factor de reducción de acción y en concreto la variable q , el factor de comportamiento.

Tanto el International Building Code (IBC) como el Eurocódigo 8 adoptan el concepto de dividir el espectro de respuesta elástico por un factor de reducción de acción ARF para llegar al diseño del espectro inelástico. La variable ARF refleja la capacidad de la estructura para disipar energía a través del comportamiento inelástico, y se usa en el diseño para reducir las fuerzas obtenidas en análisis lineal

para considerar la respuesta no lineal de la estructura.

$$R(\text{factor de modificación de respuesta IBC}) = q(\text{factor de comportamiento EC8})$$

Ceccotti concluye que puede ser un valor razonable $q = 3.00$ para construcciones en CLT si bien los resultados de la experimentación ofrecen un factor $q = 3,4$ (Ceccotti et al., 2013). Además, los resultados indican que el diseño del montaje y uniones tiene una gran influencia en el comportamiento del muro.

Los ciclos de histéresis dieron una media de pandeo de viscosidad del 12%. Además se comprobó que la rigidez de la estructura era una constante sin tener en cuenta simetrías o aberturas. Ceccotti concluye con que el comportamiento del muro se debe más a las uniones que a los propios paneles.

En los resultados de la pruebas, ningún terremoto destructivo produjo reparaciones significativas. Incluso el terremoto más grande, cercano a producir el colapso de la estructura, no fue capaz de deformar permanentemente el edificio.

2.- J.D. Dolan (Dolan 2011)

Dolan, en cambio, considera que las aceleraciones tan altas de una estructura CLT son inaceptables. Dice también que teniendo en cuenta las uniones, se pueden utilizar los paneles como muros de cortante. Expone que para más de dos alturas, los edificios en CLT necesitan mecanismos de pandeo, entre el muro de cortante y el forjado de abajo. El pandeo disipa energía disminuyendo la aceleración de la estructura y aumenta la ductilidad, aumentando el coeficiente de respuesta R .





3.3. Análisis de ciclo de vida y eficiencia estructural en edificación.



3.3.1. Escenario energético. Consumo de energía y emisiones CO₂ en edificación

La energía desempeña un papel fundamental para la consecución de los objetivos interrelacionados del desarrollo humano sostenible en los campos económico, social y medioambiental. Pero si hemos de conseguir esta importante meta, tendrán que cambiar los tipos de energía que producimos y las formas en las que las utilizamos. Si no es así, se acelerarán los daños en el medio ambiente, aumentará la desigualdad y el crecimiento económico mundial estará en peligro (Anderson D. et al., 2000).

Nuestro futuro energético depende en gran medida de las acciones no sólo de los gobiernos, sino también de las uniones regionales, del sector privado y de la sociedad civil. Esta difusión externa comprende diálogos regionales, intercambios entre países en vías de desarrollo y países industrializados, y consultas con una amplia gama de terceros, incluyendo al sector privado, que no siempre están presentes en los debates.

Pero asimismo nos enfrentamos también a otros desafíos como por ejemplo los altos precios de los suministros energéticos en muchos países, la vulnerabilidad a las interrupciones del suministro y la necesidad de más servicios energéticos para respaldar el desarrollo continuo.

En la actualidad, la disponibilidad de energía asequible y abundante permite que mucha gente disfrute de un confort, movilidad y productividad sin precedentes. En los países industrializados, las personas consumen 100 veces más energía, en términos per cápita, que los seres humanos antes de que aprendiesen a utilizar el potencial de la energía del fuego (Anderson D. et al., 2000).

El término energía sostenible debe ser referido a la energía producida y utilizada de modo que respalde el desarrollo humano a largo plazo, en todas sus dimensiones sociales, económicas y ambientales. En otras palabras, este término no se refiere simplemente a un suministro continuo de energía, sino a la producción y uso de recursos energéticos de forma que fomenten el bienestar humano y el equilibrio ecológico a largo plazo (Anderson D. et al., 2000).

Aunque parece que no hay límites físicos al suministro de energía mundial durante al menos los próximos 50 años, el actual sistema energético es insostenible tanto por motivos de equidad como por cuestiones de carácter ambiental, económico y

geopolítico que tendrán repercusiones en el futuro.

Un sistema energético está constituido por un sector de suministro de energía y por tecnologías energéticas de uso final. El objeto del sistema energético es proporcionar a los consumidores los beneficios que la energía ofrece. Para describir estos beneficios se emplea el término servicios energéticos. En los hogares, estos beneficios incluyen la iluminación, los alimentos cocinados, temperaturas interiores cómodas, refrigeración y transporte. Los servicios energéticos también son necesarios para la práctica totalidad de las actividades comerciales e industriales.

El grado de interdependencia entre la actividad económica y el uso de la energía no es estático ni uniforme entre las regiones. La intensidad energética, la relación entre la demanda de energía y el PIB, depende a menudo de una etapa de desarrollo del país.

Actualmente, la eficiencia energética mundial de convertir la energía primaria en energía útil es aproximadamente un tercio. En otras palabras, dos tercios de la energía primaria se disipan en los procesos de conversión, principalmente en forma de calor de baja temperatura (Anderson D. et al., 2000).

Durante los próximos 20 años, la cantidad de energía primaria necesaria para un determinado nivel de servicios energéticos se podría reducir de forma rentable en un 25-35 por ciento en los países industrializados.

Estas reducciones se producirían principalmente en la fase de conversión de energía útil en servicios energéticos en los sectores residencial, industrial, de transporte, público y comercial. Son económicamente alcanzables reducciones de más del 40 por ciento en las economías de transición. Y en la mayoría de los países en vías de desarrollo – que tienden a tener un alto crecimiento económico y unos stocks estancados de capital y de vehículos – los potenciales de mejora económica oscilan del 30 a más del 45 por ciento, con relación a las eficiencias energéticas logradas con la existente masa de capital.

En 2009, la demanda nacional en España de energía primaria ha experimentado un notable descenso del 8,3%, respecto al año previo, lo que representa un consumo de 130.508 Ktep. Prácticamente, todas las fuentes energéticas, a excepción de las renovables, han visto disminuida su demanda en un intervalo que va del 6,6%, en el

caso de los productos petrolíferos, al 26% en el caso del carbón.

Las energías renovables, por su parte, continúan su tendencia al alza, con un incremento del 12,6%, a lo cual han contribuido principalmente la producción eólica, la solar y la de biocarburantes. En general, la situación observada en el año 2009 responde en parte a efectos estructurales ocasionados por la actual crisis; efectos a los que se suma la tendencia iniciada a partir del año 2004 en la mejora de la eficiencia energética, lo que conjuntamente contribuye a un descenso acusado en la demanda energética (Montero & Serrada 2013).

La sostenibilidad requiere eficiencia en los procesos. En el caso concreto de la edificación, la energía embebida y las emisiones de CO₂ a la atmósfera serán los parámetros reguladores de la sostenibilidad ambiental, como claros indicadores del grado de eficiencia del edificio.

En los últimos años se ha producido un aumento desmesurado de emisiones de CO₂ a la atmósfera superando los límites establecidos en el Protocolo de Kioto. La figura 41 explica las emisiones brutas anuales de CO₂ al ambiente en España durante los últimos años y el límite establecido por Kioto.

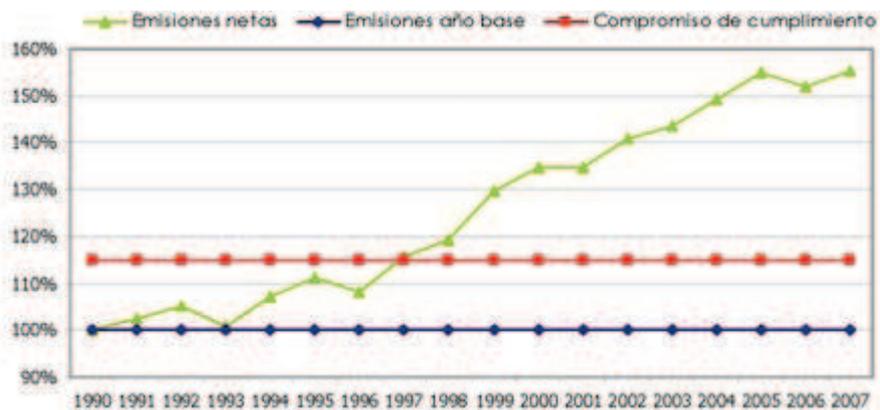


Fig. 41 - Emisiones CO₂ global España y límite establecido por Kioto. (Montero & Serrada 2013)

Por su parte, el sector edificación supone un elevado porcentaje de las emisiones

totales de CO₂ a la atmósfera (fig. 42) (Yeheyis et al. 2013). Según el Ministerio de Vivienda, la quinta parte de las emisiones GEI (gases de efecto invernadero) a la atmósfera en España es debida al consumo energético de los edificios. Si a esta cifra le añadimos la energía embebida necesaria para fabricar los materiales de los que están contruidos, la cifra aumenta hasta convertirse en una tercera parte de dichas emisiones. (Cuchi A. & Pagés A., 2007)

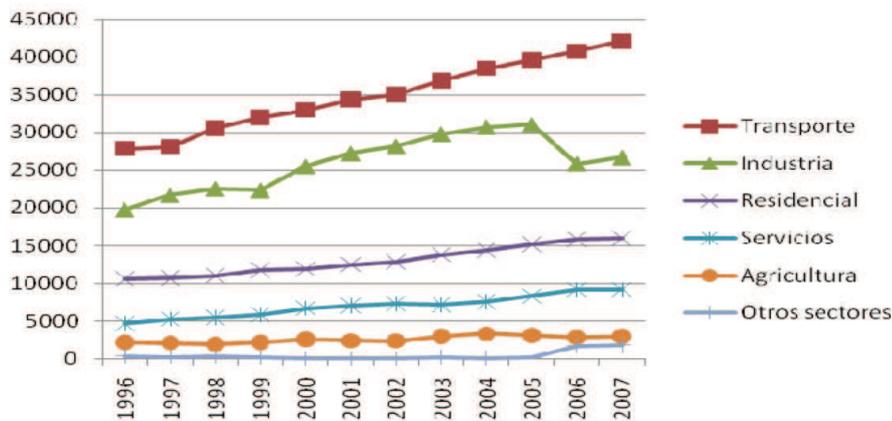


Fig. 42 - Evolución del consumo de energía final [ktep/año] en España durante el periodo 1996-2007 en los distintos sectores de actividad. (Zabalza 2011)

Parece existir un énfasis generalizado por la eficiencia energética de los inmuebles una vez concluido el proceso edificatorio, sin tener en cuenta que el propio proceso de construcción supone un importante porcentaje en el total ciclo de vida del edificio. El consumo energético para la extracción, procesado, fabricación, puesta en obra y demolición de los materiales utilizados en las estructuras de edificación genera una enorme producción de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Parece pues lógico realizar una medición exhaustiva de dichas emisiones, y que la certificación energética no sólo haga referencia al periodo de utilización, sino al completo ciclo de vida del edificio (Mercader 2012). La figura 43 muestra la energía consumida por un edificio actual en el ciclo de vida completo del mismo para ver la importancia de un estudio completo y no únicamente ceñido al periodo de utilización del inmueble.

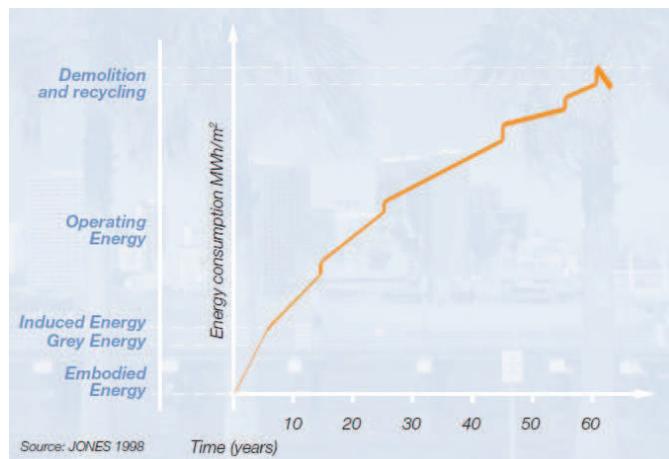


Fig. 43 - Energía consumida en la vida de un edificio estimada en 60 años. (Huovila et al. 2007)

Investigaciones actuales estiman que la energía demandada se incrementará en un cuarenta por ciento en los próximos 20 años principalmente en los países desarrollados. Las razones que hay detrás de ese incremento son el continuo aumento de la población, el movimiento de producción en los países asiáticos, y una emergente clase media en dichos países. Sin embargo, la distribución de esta demanda en la actualidad sigue siendo desigual y estable, asequible, eficiente en modo que es necesario desarrollar sistemas de energía respetuosas con el medio ambiente. Los políticos y la industria de la energía deben abordar los tres vértices del trilema que compone la seguridad energética, la equidad social y la mitigación del impacto ambiental. (Policies for the future 2012)

A pesar de esta elevada demanda esperada, como se ha comentado anteriormente, los progresos hacia una política energética sostenible son escasos. En relación a la polución, los niveles máximos establecidos por el protocolo de Kioto para emisiones de gases de efecto invernadero se han superado claramente por la mayoría de países industrializados en los últimos años (Sikdar 2009).

Ante estos datos, los gobiernos e instituciones no suelen tomar medidas hasta que la situación es muy grave y con consecuencias devastadoras. Es necesario precaver planes de contingencia de este elevado número de emisiones para garantizar la sostenibilidad del planeta (Larsson 2010). Un buen ejemplo de ello lo constituye la iniciativa Building Technologies Programme (en lo sucesivo BTP) del Departamento de Energía de los Estados Unidos. Uno de los objetivos del BTP es conseguir desarrollar tecnologías y enfoques de cara a un correcto diseño para conseguir edificios con

consumo de energía cero, es decir un balance cero entre la energía consumida y la energía producida (Zabalza 2011). La figura 44 muestra dicha previsión fijada para el año 2020.

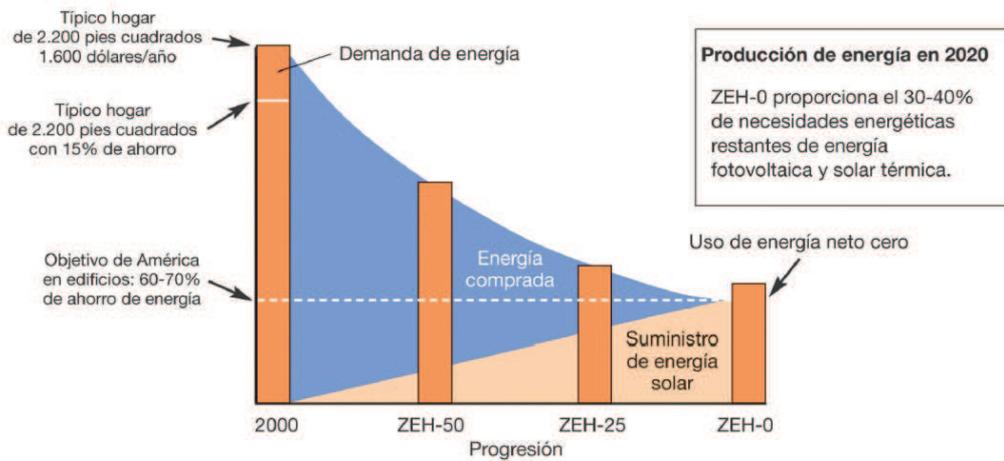


Fig. 44 - Evolución hacia el objetivo de edificios de energía cero. (Zabalza 2011)

Por su parte, además del Análisis del Ciclo de Vida, hay autores que proponen complementar con otros métodos de valoración que proporcionan una imagen más completa de la sostenibilidad (Bare 2013). El estudio detallado de un modelo que examine cuidadosamente y de forma global la sostenibilidad de la transformación de los bosques en materiales de construcción parece lógico y necesario, para conseguir de este modo una reducción sustancial de las emisiones (Cabezas et al. 2003).

3.3.2. Eficiencia estructural

Podemos considerar a la Naturaleza como un enorme sistema para extraer energía, no de fuentes concentradas sino difusas, y utilizar esta energía para mantener la enorme economía del planeta. Pero para preservar la sostenibilidad, se necesitaría plantear de forma totalmente diferente el concepto de eficiencia. La naturaleza se ha enfrentado a este problema históricamente en términos de su inversión metabólica (Gordon, 2004).

Según se ha explicado en el apartado anterior, el sector edificación debe minimizar el impacto sobre el medio ambiente. En el presente apartado se explicará el concepto de energía embebida y emisiones de CO₂ al ambiente, y sus metodologías de cálculo más habituales.

La figura 45 muestra la demanda de energía primaria para la fabricación de los materiales intervinientes en el sector construcción por m² construido, mientras que la figura 46 hace lo mismo pero en relación a las emisiones de CO₂ (Zabalza, 2011).

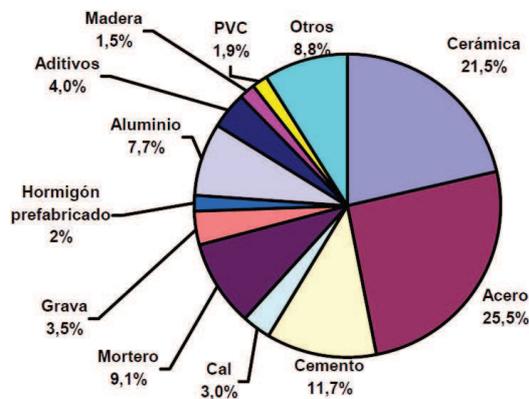


Fig. 45 – Contribución a la demanda de energía primaria para la fabricación de materiales

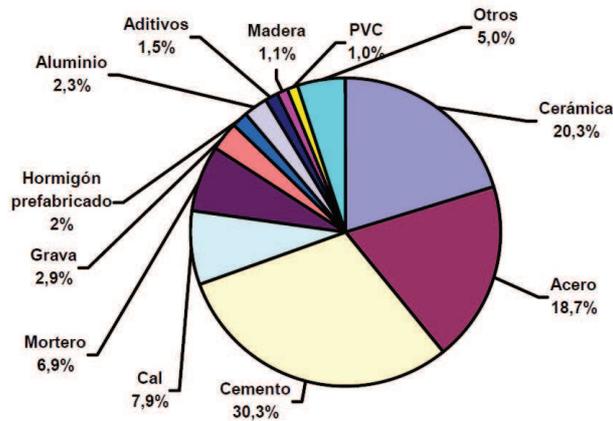


Fig. 46 – Energía necesaria de fabricación por material y su equivalencia en TEP

Los sistemas estructurales se pueden dividir en dos grandes grupos:

- 1.- Los sistemas de **alta energía estructural**. Dedicados a soportar las cargas muy elevadas derivadas de obras de ingeniería civil.
- 2.- Los sistemas de **baja energía estructural**. Construidos con la finalidad de soportar cargas de menor intensidad, propias del sector edificación, en especial la tipología residencial.

Tal cual se muestra en las figuras 42 y 43, el acero estructural y el hormigón necesitan de una gran cantidad de energía por tonelada. En las estructuras poco cargadas que son en general necesarias en los sistemas de baja energía estructural, el peso real de los sistemas realizados con acero u hormigón es posiblemente varias veces mayor de lo que debería tener si se hubiesen hecho de materiales más ingeniosos y más civilizados. La madera es uno de los materiales más eficientes en sentido estrictamente estructural (Gordon, 2004).

El diseño de una serie de estructuras de alta tecnología, como los aviones, está controlado en gran parte por el criterio E/p , es decir, el módulo específico de Young del que depende el costo en términos de peso de limitar las deformaciones globales. Puede observarse que existe un gran incentivo para la densidad baja por ello, el acero queda en muy mal lugar, aun comparado con el ladrillo y el hormigón.

La exigencia de un costoso y estricto control de las deformaciones globales parece estar bastante limitada: sin embargo, el costo en peso -y a menudo el costo en dinero- de soportar esfuerzos de compresión es con frecuencia muy elevado. El costo en peso de soportar una carga a compresión depende, no de E/ρ sino de $\sqrt{E/\rho}$. El costo en peso de un panel, depende de la expresión $\sqrt[3]{E/\rho}$

Tabla eficiencia estructural de los materiales. Módulo de rigidez específico

Material	Modulo de young N/mm ²	Densidad gr / cm ³	E/ρ	$\sqrt{E/\rho}$	$\sqrt[3]{E/\rho}$
Acero	210.000	7,8	27.000	59	7,7
Titanio	120.000	4,5	27.000	77	11,0
Aluminio	73.000	2,8	26.000	99	15,0
Magnesio	42.000	1,7	25.000	120	20,5
Vidrio	73.000	2,4	30.000	114	17,5
Ladrillo	21.000	3,0	7.000	48	9,0
Hormigón	15.000	2,5	6.000	49	10,0
F de carbono	200.000	2,0	100.000	225	29,0
Madera	14.000	0,5	28.000	240	48,0

Tabla 1 - Eficiencia estructural de los materiales. Módulo de rigidez específico.

La tabla anterior encuentra su explicación matemática mediante el siguiente proceso. Supongamos que un conjunto n de paneles pueden romper por pandeo elástico según la formulación:

$$N_{CR} = n \pi^2 \frac{EI}{L^2}$$

Si la inercia del panel depende únicamente de su espesor, podemos definirla como:

$$I = cte \times e^3$$

Obtenemos pues el valor de e :

$$e^3 = cte \frac{N_{CR} L^2}{\pi^2 n E}$$

El peso propio de n paneles por unidad de ancho será:

$$PP = n \cdot e \cdot d \cdot L \cdot cte = n \cdot d \cdot L^3 \sqrt{\frac{N_{CR} L^2}{\pi^2 n E}} cte$$

Para obtener la eficiencia del material basta con dividir la carga máxima por el peso propio del sistema. Operando obtenemos la expresión:

$$Eficiencia = \frac{N_{CR}}{PP} = cte \cdot \frac{1}{n^{2/3}} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{E}}{d}\right) \cdot \left(\frac{N_{CR}^{2/3}}{L^{5/3}}\right)$$

Donde:

$\left(\frac{N_{CR}^{2/3}}{L^{5/3}}\right)$ Es el coeficiente de carga de la estructura

y,

$\left(\frac{\sqrt[3]{E}}{d}\right)$ Es el criterio de eficiencia del material

La tabla 1 muestra claramente cómo la madera cuadruplica y quintuplica a sus dos inmediatos competidores en eficiencia estructural cuando de sistemas bidimensionales se trata. Pero esta formulación teórica a priori no puede validarse sin el correspondiente estudio energético que pondrá en práctica y para un abanico muestral concreto de edificación la conveniencia o no del uso de la madera contralaminada.

Realizada esta pequeña introducción, será la metodología basada en el análisis de ciclo de vida, la que visualizará con mayor rigor y determinación el fenómeno. El sistema que demande menor cantidad de energía y a su vez, menor cantidad de emisiones de CO₂ al ambiente, será el más eficiente en términos de eficiencia estructural, al estudiar únicamente los apartados de estructura y cerramientos, pero bajo la óptica energética de un método global.

3.3.3. El método del Análisis de Ciclo de Vida

Justificación de la metodología y normativa

La producción de edificios, como se ha mencionado anteriormente, produce una demanda de recursos mediambientales y genera una salida de contaminantes al mismo sistema.

Centrada la actual certificación energética en la etapa de utilización del edificio, conviene aclarar que existen procesos como la extracción de materias primas y su transporte, el consumo de energía para fabricar los materiales intervinientes en la obra y su transporte desde la producción hasta la obra, el consumo energético derivado de la propia construcción del edificio, el mantenimiento del mismo, incluida la estructura, así como finalmente su demolición.

Resulta necesario elaborar metodologías de evaluación de impacto ambiental que permitan aglutinar todos esos procesos en un análisis único. (Jönsson Ä, 2000). De entre las metodologías posibles, el Análisis de Ciclo de Vida (en adelante ACV) resulta ser una de las metodologías de evaluación ambiental más objetiva, proporcionando el marco idóneo para evaluar los potenciales impactos ambientales de todos los productos y procesos referentes a la construcción. (Communication on integrated product policy, 2003)

Existen en la actualidad un conjunto de herramientas que permiten aplicar el ACV para el caso concreto de la edificación. Pero, como la aplicación concreta para el sector obliga a realizar determinadas simplificaciones, las discrepancias sobre la aplicación de una u otra depende de criterios como son (Zabalza I, 2011):

- 1.- Elegir los indicadores medioambientales más adecuados
- 2.- Posibilidades de simplificación
- 3.- Adaptación del ACV en función de los objetivos del proyecto.

La construcción de un edificio supone la realización de un producto muy especial de estudio para el ACV. Con vida útil que supera los cincuenta años, suele estar sometido a una gran cantidad de reformas en su etapa de utilización, alberga una gran cantidad de usos, se construye con una enorme variedad de materiales y posee una localización única. Además asentado a veces en entornos de urbanización, resulta difícil establecer los límites del sistema.

Actualmente, diferentes autores han ampliado el carácter inicial del ACV a tenor de las tres principales vertientes que posee la sostenibilidad bajo la denominación "P":

- 1.- "**people**", haciendo mención a la dimensión social del ACV, el modelo de ACV Social.
- 2.- "**planet**", recordando el carácter ambiental del ACV, proponiendo un modelo de AVCS, es decir, ACV Sostenible.
- 3.- "**profit**", relacionando la sostenibilidad con la economía, se obtiene el ACCV ó análisis de coste de ciclo de vida.

Mediante la combinación del ACV con el ACCV se pueden obtener interesantes conclusiones como por ejemplo identificar la solución técnica que obtiene un determinado objetivo medioambiental establecido con el menor coste. (Zabalza I. et al., 2008a)

La normativa que regula actualmente la evaluación del ACV, en su versión general, es la norma UNE-EN ISO 14040:2006 y UNE-EN ISO 14044:2006, aunque su aplicación abre un campo muy amplio de interpretaciones y simplificaciones.

Para el caso concreto del sector edificación existe un estándar metodológico que permite cuantificar los impactos ambientales. La norma UNE-EN 15804 establece los criterios para desarrollar las reglas de categoría de producto (en adelante RCP) para todos los productos y servicios de construcción. Proporciona además una estructura para garantizar que todas las Declaraciones ambientales de producto (en adelante DAP) de los productos de construcción, servicios de construcción y procesos de construcción se obtienen, verifican y presentan de una forma armonizada.

Desarrollo metodológico del ACV

La metodología del estudio de ACV implica necesariamente la división en cuatro etapas diferenciadas, que se resumen en la siguiente figura 47. Dichas fases se hallan permanentemente interrelacionadas, generando un modelo dinámico.

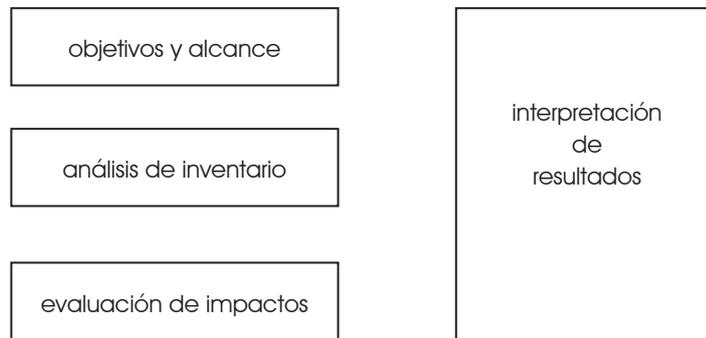


Figura 47 - Metodología general de ACV

En el caso concreto de la aplicación de la metodología ACV a los edificios, es constante el problema de falta de datos en el inicial proceso de diseño, mientras que las opciones de generación en las diferentes categorías de impacto son muy amplias. Este proceso, a medida que la geometría se va definiendo, se va acotando y la precisión del ACV es mucho mayor.

En relación a cada fase del proceso podemos hacer las puntualizaciones siguientes:

1.- Definición de alcance y objetivos.

El objetivo del análisis de ACV debe definirse claramente. Es aquí donde se describen los motivos por los que se realiza el estudio, donde se describe el objeto de estudio y donde se especifica la utilización prevista de los resultados.

El alcance del estudio debe ser el suficiente para garantizar profundidad, amplitud y detalle del estudio, que permita obtener los objetivos propuestos. No obstante, al tratarse de una técnica iterativa, se puede modificar en cualquier momento la aplicación del alcance al análisis ACV. Variará en gran medida debido a la enorme variedad de ubicaciones y disposiciones de diseño de cada edificio. Importante recordar que para ser comparables dos edificios deberán ser analizados según inventarios de ACV idénticos.

En la definición del alcance habrá que definir (Zabalza, 2011):

- a.- La función del sistema a estudiar, es decir la función que se realizará en el interior del edificio, en modo que no serán comparables edificios con diferentes usos ni ubicados en países diferentes, por tener normativas diferentes.

b.- La unidad funcional, que será objeto de todas las entradas y salidas de recursos e energía primaria del sistema. Puede ser desde un edificio entero, hasta un metro cuadrado, o hasta el espacio donde una persona pueda desempeñar su trabajo o vida. El concepto de equivalente funcional (CEN/CT 350, 2008) se establece para poder comparar los resultados de los estudios de ACV en diferentes edificios y ubicaciones.

c.- El sistema, que es el conjunto de procesos intercomunicados energética o materialmente, producen el producto estudiado en el mercado.

d.- Los límites del sistema. En este caso mencionar que no es necesario invertir recursos en cuantificar entradas y salidas que no modifiquen sustancialmente los resultados, para no sobrecargar el sistema. Para edificios, el comité (CEN/CT 350, 2008) establece las siguientes etapas o subsistemas del edificio: producción, construcción, uso y disposición final. La tabla 2 especifica cada una de las etapas.

Tabla de comparativa iniciativas metodología ACV en edificación

Etapas	Aspectos incluidos
Producción del edificio	Materias primas
	Transporte
	Fabricación
Construcción del edificio	Transporte
	Procesos on-site de construcción
Uso del edificio	Mantenimiento
	Reparación y reemplazo
	Rehabilitación
	Consumo de energía final
	Consumo de agua
Disposición final del edificio	Deconstrucción
	Transporte
	Reciclado/Reutilización
	Disposición final en vertedero/Incineradora

Tabla 2 - Comparativa iniciativas metodología ACV en edificación.

Elaboración por el autor según CEN/TC 350

e.- Categorías de impacto y metodologías de evaluación de impacto. Cada metodología selecciona y pondera en mayor o menor medida cada categoría de impacto, obteniendo pues resultados diferentes. Según el Comité Europeo de Normalización para la realización de estudios de ACV en edificios (CEN/CT 350, 2008), se han considerado las siguientes categorías de impacto reflejadas en la tabla 3.

tabla de categorías de impacto sugeridas para ACV en edificación

Categoría de impacto	Unidades
Calentamiento global potencial	Kg CO ₂ - equivalentes
Destrucción de la capa de ozono	Kg CFC -11 - equivalentes
Acidificación de la tierra y el agua	Kg SO ₂ - equivalentes
Eutrofización	Kg PO ₄ -equivalentes
Formación de ozono troposférico	Kg C ₂ H ₂ - equivalentes
Residuos radiactivos	Kg
Uso de energía primaria renovable / no renovable	MJ
Uso de los recursos de agua dulce	m ³
Uso de recursos renovables / no renovables	Kg
Uso de recursos reciclados / reutilizados	Kg
Materiales para reciclaje o para valoración energética	Kg
Residuos peligrosos y no peligrosos para disposición final	Kg

Tabla 3 - Categorías de impacto sugeridas para ACV en edificación.

Elaboración por el autor según CEN/TC 350

f.- Requisitos de calidad de los datos. Los datos introducidos al sistema deberán tener la calidad necesaria para conseguir los objetivos propuestos.

2.- Análisis de inventario

El análisis de inventario comprende la obtención de datos y su posterior procedimiento de cálculo, para cuantificar cada una de las entradas y salidas del sistema definido, a modo de balance de flujos elementales, durante la vida útil de la unidad funcional seleccionada. Los flujos elementales serán energía primaria y utilización de materias primas obtenidos directamente de la Naturaleza o bien cuyo destino es la Naturaleza. De cada proceso estudiado, se obtienen unas entradas y unas salidas, según la figura 48.

Los datos utilizados en el análisis de inventario pueden ser propios, procedentes de bases de datos, provenientes de declaraciones ambientales de producto suministradas por los fabricantes.

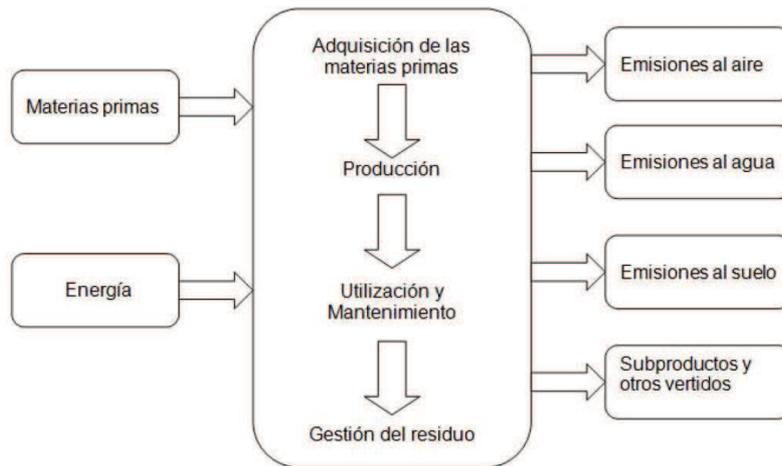


Figura 48 - Inventario de ciclo de vida aplicado a un proceso del sistema. (Zabalza, 2011)

3.- Evaluación de impactos

En esta fase se seleccionan unas determinadas categorías de impacto para luego calcular los indicadores numéricos de categoría. De este modo distinguiremos estas fases:

- a.- Clasificación. Se asignan los datos del inventario a las categorías de impacto seleccionadas. Cada metodología de cálculo de ACV establece unas categorías de impacto determinadas.
- b.- Caracterización. Se calculan los indicadores numéricos de categoría, para cada categoría de impacto. Así pues, los resultados del inventario de ciclo de vida se convierten a unidades comunes utilizando los factores de caracterización. Los resultados convertidos se asocian como valor numérico a cada categoría de impacto. Así pues, cada sustancia contribuirá en mayor o menor medida dependiendo de su factor de caracterización.

c.- Normalización. Se trata de una etapa opcional del análisis de inventario. Muestra el grado de contribución de cada categoría de impacto al problema medioambiental global. De este modo, los valores obtenidos en la caracterización se multiplican por los factores de normalización para cada categoría de impacto. De este modo se entiende mejor la magnitud relativa de los indicadores numéricos obtenidos en la caracterización.

d.- Ponderación. Es una etapa opcional y subjetiva. Con los resultados numéricos de los indicadores normalizados, se multiplican por los factores de ponderación, factores subjetivos que modifican el valor final, así como agrupan determinadas categorías de impacto.

4.- Interpretación de resultados

Esta fase combina y resume los resultados de las anteriores para emitir una serie de conclusiones y recomendaciones que permitan obtener los objetivos del estudio. Mencionar tres sub-fases en que debe ser dividido este apartado. De este modo tenemos:

a.- Identificación de variables significativas. consiste en determinar cuales producen mayores impactos y cuales se pueden obviar

b.- Verificación de resultados, mediante análisis de integridad , sensibilidad y consistencia

c.- Conclusiones y recomendaciones. Considerando todas las fases del ACV. Las recomendaciones se basarán en las conclusiones obtenidas.

Metodologías y herramientas de análisis de ACV

En la figura 49 (Zabalza, 2011) se exponen las principales metodologías de evaluación de impacto ambiental según ACV. Llama la atención que en ninguna de ellas figura España como país participante.

Metodología	Características	Entidad desarrolladora
CML 92	Método de impacto intermedio muy utilizado con una caracterización relativamente simple y diversas opciones de normalización	CML (Holanda)
CML 2 baseline 2000	Actualización del método CML 92 con modelos más avanzados	CML (Holanda)
EPS 2000	Método orientado a daños, que considera la monetarización (disposición a pagar) como ponderación	IVL (Suecia)
Ecoindicador 95	Método de distancia al objetivo, basado en objetivos científicos. Incluye modelos orientados a los daños	PRé (Holanda)
Ecoindicador 99	Actualización del método Ecoindicador 95. Método orientado a los daños, utiliza indicadores de categoría de impacto final. Incluye 3 versiones que consideran distintas hipótesis	PRé (Holanda)
IMPACT 2002+	Método orientado a los daños con muchas semejanzas al método Ecoindicador 99, pero con los factores de toxicidad completamente recalculados	EPFL (Suiza)
TRACI 2002	Método de impacto intermedio desarrollado por US EPA	US EPA (Estados Unidos)
Ecopuntos 97 y 2006	Método de distancia al objetivo, basado en los objetivos de la política suiza. También conocido como método Ecoscarcity o UBP. Existen dos versiones: 1997 y 2006, siendo ésta la última actualización	E2, ESU services (Suiza)
EDIP 97 y 2003	Método de caracterización y normalización desarrollado por la DTU. Existen dos versiones: 1997 y 2003, siendo ésta la última actualización	EDIP - DTU (Dinamarca)
LIME	Método japonés que incluye diversas categorías de impacto intermedio y final	AIST (Japón)
LUCAS	Método canadiense de impacto intermedio que adapta algunos modelos de caracterización de TRACI 2002 e IMPACT 2002+	CIRAIG (Canadá)
RECIPE	Método reciente que integra y actualiza los métodos Ecoindicador 99 y CML 2, incluyendo categorías de impacto intermedio y final	RUN, PRé, CML y RIVM (Holanda)
MEEUP	Metodología de impacto intermedio enfocada al diseño ecológico de productos	VhK (Holanda)

Figura 49 - Metodologías de evaluación de impactos del ciclo de vida (Zabalza, 2011)

Respecto a las herramientas desarrolladas en la actualidad diferenciar aquellas que son de aplicación exclusiva para edificación, de manejo más intuitivo y ceñido al marco de edificación, pero limitadas en los datos e hipótesis a introducir; mientras que las herramientas de aplicación de ACV general son más complejas en su manejo, pero permiten mayor libertad de diseño e introducción de datos. Existen un gran número de herramientas relacionadas con el impacto medioambiental de los edificios, si bien a continuación, en la figura 50_a y 50_b sólo se muestran aquellas cuyo funcionamiento se basa en la metodología del ACV.

Programa	Compañía desarrolladora	Contacto	Comentarios
ECOEFFECT	KTH- Kungliga Tekniska högskolan, Högskolan i Gävle (Suecia)	<www.ecoeffect.se>	Evaluación de los impactos "externos" (uso de energía y materiales) e "internos" del edificio (ambiente interior y exterior) y evaluación de costes de inversión, operación y mantenimiento
ECO-SOFT	IBO-Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie (Austria)	<www.ibo.at/de/ecosoft.htm>	Cálculo de las necesidades de materiales, transporte y energía, así como emisiones al aire, vertidos al agua y suelo, y residuos asociados a la vida útil de un edificio. No válido para estudios de ACCV
EQUER	Armines, IZUBA Energies (Francia)	<www.izuba.fr>	Simulación del ciclo de vida de un edificio, proporcionando diversos indicadores medioambientales del edificio. Posibilidad de entrada de datos en 2D y 3D y vinculación con la herramienta de simulación energética COMFIE
GREENCALC+	Sureac Trust (Holanda)	<www.greencalc.com>	Evaluación del coste de prevenir los daños medioambientales de la construcción y uso de un edificio y obtención de un índice medioambiental global del edificio. El análisis abarca aspectos relacionados con la energía, materiales, agua y movilidad del edificio

Figura 50_a - Aplicaciones de ACV específicamente adaptadas para edificación (Zabalza, 2011)

ECO-QUANTUM	IVAM-ER (Holanda)	< www.ivam.uva.nl >	Evaluación del comportamiento medioambiental de un edificio mediante el cálculo de 4 marcadores medioambientales (recursos, emisiones, energía y residuos) que se agregan para obtener un indicador medioambiental global del edificio
LEGEP	LEGEP Software GmbH (Alemania)	< www.legep.de >	Cálculo de la demanda y costes energéticos asociados a la operación del edificio así como a la construcción, mantenimiento, rehabilitación y demolición del edificio
BECOST	VTT (Finlandia)		Cálculo del perfil ambiental (en forma de emisiones, consumo de energía y de materias primas) de los materiales y soluciones constructivas del edificio, así como del coste de las soluciones constructivas seleccionadas y del edificio completo en el ciclo de vida
ENVEST 2.0	BRE-Building Research Establishment (Reino Unido)	< investv2.bre.co.uk >	Evaluación de 12 categorías de impacto medioambiental y cálculo de la puntuación única del edificio considerando sus materiales constructivos, sistemas energéticos, etc. y cálculo de los costes del ciclo de vida
ATHENA	Athena Sustainable Materials Institute (Canadá)	< www.athenasmi.ca >	Evaluación medioambiental comparativa de diversos diseños de edificios y los materiales y soluciones constructivas seleccionadas durante las fases de diseño preliminar del edificio
BEES	NIST -National Institute of Standards and Technology (EE.UU.)	< www.bfrl.nist.gov/oa/software/bees.html >	Comparaciones entre materiales constructivos basadas en ACV y ACCV que se combinan en una sola puntuación final
LTE-OGIP	t.h.e. Software GmbH (Alemania)	< http://www.the-software.de/ogip/einfuehrung.html >	Evaluación de los impactos medioambientales en la construcción y operación de un edificio, y cálculo de los costes y el consumo de energía en su funcionamiento a partir de la definición de sus elementos constructivos

Figura 50_b - Aplicaciones de ACV específicamente adaptadas para edificación (Zabalza, 2011)

Estado actual de las investigaciones del ACV en edificación

En los últimos años el número de publicaciones en relación al ACV se han multiplicado. También en relación al ACV aplicado al sector edificación se ha experimentado un notable aumento. Una conciencia mayor en materia de sostenibilidad ha permitido hacer hincapié en un sector tan generador de emisiones como el de la edificación. El ahorro energético producido mediante la utilización de materiales con baja energía incorporada puede estar en el entorno del 20% (Hubermann N., Pearlmutter D., 2008).

Los resultados de las investigaciones son muy variados, dependiendo en gran medida de la tipología edificatoria y las condiciones climáticas de su ubicación. De este modo, la energía embebida en los materiales utilizados para la fabricación del edificio, considerando edificios ubicados en diferentes condiciones climáticas, varía:

1.- Entre un 9% y un 46%, si los edificios son de bajo consumo energético (Sartori I., Hestnes AG., 2007)

2.- Entre un 2% y un 38%, para edificios convencionales.

Segun Zabalza (Zabalza et al. 2009a) el consumo de energía primaria embebida en los materiales para una vivienda unifamiliar que cumpla estrictamente el código técnico, supone el 30% de las necesidades de energía durante su vida útil. Si incrementamos los valores mínimos normativos hasta unos valores de aislamiento mayores, la energía embebida representa un 60% del total, mientras que la energía en el periodo de utilización disminuye hasta un 35% (Cuchi A., 2008)

Por último, la etapa de demolición y reciclaje de los materiales de construcción también ha de ser tenida en cuenta, representando un 30% y un 18% del potencial de reciclaje en términos de energía y emisiones de CO₂ respectivamente (Blenguini G.A., 2009). En algunos materiales puede alcanzar incluso el 50% de la energía incorporada.

Según Zabalza (Zabalza, 2011) se han de realizar algunas simplificaciones del modelo de análisis de ciclo de vida. Se exponen a continuación el elenco de posibles simplificaciones del modelo:

- 1.- Mínimo número de datos de entrada. Fácilmente identificables en el proyecto arquitectónico
2. Indicadores y categorías de impacto sencillas (energía, emisiones de CO₂)
- 3.- Eliminación de etapas, de modo que quedarían tres: producción, gestión y destrucción

Desde el punto de vista de la estructura del edificio, se puede decir que el tipo de estructura condiciona fuertemente los resultados del análisis ACV. (Xing S., et al. 2008) compara dos estructuras realizadas en acero y hormigón armado respectivamente. Los resultados reflejan que si bien la estructura de acero demanda menos cantidad de energía que la de hormigón, debido a su peor comportamiento térmico por el elevado coeficiente de transmisión térmica, hace que el acero presente mayor impacto en términos de energía primaria y emisiones de CO₂ al ambiente.

La utilización de la madera en estructuras ha demostrado demandar menor cantidad de energía y emisiones CO₂ durante su ciclo de vida que sus respectivos competidores, acero y hormigón armado. Numerosos autores han llegado a esta conclusión en sus investigaciones (Buchanan A., Levine B., 1999; Goverse T., 2001; Gustavson L., Pingoud K., Sathre R., 2006). (Petersen A.K. & Solberg B., 2005) demuestran que la utilización de madera supone un ahorro del 50% en emisiones de Kg de CO₂-eq /m³ durante el periodo de vida útil del edificio, en diversos edificios de Noruega y Suecia tomados como muestra.

Otros estudios han llegado hasta el punto de demostrar que un edificio de 8 viviendas ubicado en Suecia con estructura de madera y un sistema de co-generación por biomasa puede llegar a producir una absorción neta de CO₂ durante su ciclo de vida (Gustavson L., Joelsson A., Sathre R., 2010)

Proyectos desarrollados en el marco ACV para edificación

A continuación, en la tabla 4_a y 4_b se mencionan las principales iniciativas en materia de ACV desarrolladas para el sector edificación en los últimos años. Se han ordenado cronológicamente para un mayor entendimiento de la evolución sufrida. I. Zabalza (Zabalza, 2011) resume las principales iniciativas en:

Tabla de comparativa iniciativas metodología ACV en edificación

Proyecto	Ambito	Objetivo	Conclusiones
REGENER	Comisión Europea 1995-1997	Metodología a nivel europeo del impacto medioambiental de los edificios basada en el ACV.	-Mejoras en la utilización de energía renovables. -Inversión inicial de mejora de la envolvente amortizada en pocos años. -Resultados muy variables dependiendo de la base de datos utilizada, sobre todo última etapa ACV.
ANEXO 31 Energy conservation in buildings and community systems programme	International Energy Agency 1996-1999	Impacto medioambiental de los edificios en términos energéticos	-Recopilación de las diferentes herramientas de ACV -Recopilación de diferentes bases de datos a nivel internacional -Identificación de todos los aspectos relevantes en la construcción bajo la metodología ACV
NAHB Workshop	NAHB 2001 EEUU	Aplicabilidad y utilidad de las herramientas ACV en edificación en EEUU	-Revisión crítica del ACV -Sugerencias para mejorar su utilidad: mejor explicación de las hipótesis consideradas y simplificación de los interfaces de salida de datos
Estudio sobre herramientas ACV y DAP	Comisión Europea 2002	Analizar herramientas existentes basadas en ACV para construcción y en las DAP	-Existe un bajo nivel de estandarización y coordinación en el ámbito del ACV y las DAP. -Falta de consenso científico, poca sensibilidad de determinados sectores industriales y poca participación de empresas y usuarios finales
Proyecto	Ambito	Objetivo	Conclusiones
Life Cycle Initiative	United Nations Environment Program 2002	Fomentar la puesta en práctica a nivel mundial del concepto de ACV en edificación.	-Elección de una unidad funcional adecuada -Directrices para la consideración de escenarios futuros en las distintas etapas del ACV. -Necesidad de mejora de las DAP con bases de datos estandarizadas.
PRESCO Red Temática Europea	Europa 2005	Ayuda en el desarrollo de herramientas de Ecodiseño basadas en ACV	-Necesidad de integrar objetivos de reducción de impacto medioambiental en los proyectos para el diseño de edificios de bajo impacto. -Necesidad de un mayor conocimiento de los técnicos redactores.

Tabla 4-a - Comparativa iniciativas metodología ACV en edificación.

Elaboración por el autor.

CALCAS	Comisión Europea 2006-2009	Mejora de la normativa ISO de ACV. Superar las limitaciones actuales	-Eliminación de paradigmas actuales sobre ACV -Mejora aplicabilidad contextos difíciles -Ampliación ámbito de aplicación
IMPRO-Building	Comisión Europea 2006-2008	Análisis del potencial de mejora medioambiental de los edificios residenciales	-Existe un enorme potencial de mejora. -Necesidad de mejorar aislamientos de cubiertas y fachadas, así como de la permeabilidad de ventanas. -Disminución de emisiones de un 30-50% en los próximos 40 años.
COST Action C-25	Europa 2006-2010	Promover el desarrollo de una construcción sostenible en Europa	-Recopilación y análisis conjunto de los resultados científicos -Integración de métodos de evaluación de impacto medioambiental
ENSLIC	Comisión Europea 2007-2010	Desarrollar estudios de ACV en edificios de varios países europeos	-Estado del arte de aplicación del ACV en sector edificación -Evalúa los indicadores ambientales más adecuados en función del propósito del estudio -Mejora en la representación de resultados para su mayor comprensión
LoRe-LCA	Comisión Europea 2009-2012	Promover el uso de nuevas tecnologías que permitan reducir el impacto ambiental	-Asesoramiento tecnológico en la construcción y mantenimiento de edificios mediante el uso del ACV y otros indicadores medioambientales -Conjuntos de casos de estudio. Importancia de cada variable

Tabla 4-b - Comparativa iniciativas metodología ACV en edificación. Elaboración por el autor.

Mediante estos proyectos internacionales de investigación basados en el ACV se promueve, entre otros, la construcción de edificios de cero emisiones de ciclo de vida con nulo impacto ambiental, que teniendo interiormente óptimas condiciones de confort, limitan el uso de recursos naturales, así como desarrollar técnicas avanzadas de ecodiseño arquitectónico.

A pesar de todos estos esfuerzos, muchas son las barreras que actualmente posee el ACV en edificación, como por ejemplo los prejuicios sobre la elevada complejidad de los procesos a desarrollar para su evaluación, así como la ambigüedad generada en los resultados dependiendo de las bases de datos a utilizar. En ese escenario tampoco ayuda el no poseer unas bases de datos de inventario para edificación, y el oscurantismo ya mencionado de algunos fabricantes de materiales en referencia a las DAP.

Por último mencionar la carencia legislativa en materia de ACV, así como la falta de incentivos económicos para su aplicación, hasta el punto de no haber ninguna relación entre los procesos de certificación energética existentes en la actualidad y la metodología ACV. De este modo se da la paradoja que, edificios con una certificación excelente durante el periodo de vida útil, obvian un consumo excesivo de energía en la fabricación de la envolvente, que en ningún documento se refleja en la actualidad.



3.4. Uso masivo de madera en edificación y crecimiento forestal en España.



3.4.1. Demanda de volumen de madera del sector edificación en España

Con el objetivo último de generar un modelo matemático capaz de dar respuesta a la posibilidad de abastecimiento prolongado del sector edificación residencial en toda su dimensión, se ha dividido el cálculo en dos grandes bloques.

- 1.- El primero estudia la demanda potencial de vivienda de nueva construcción.
- 2.- El segundo estudia la demanda potencial de vivienda en rehabilitación.

Demanda de viviendas de nueva construcción

En una primera aproximación al fenómeno de cuantificar la demanda de vivienda, procede acudir a la previsión sobre el crecimiento demográfico previsto por el INE respecto al Reino de España para los próximos 40 años. En dicha previsión se observa un envejecimiento continuado de la población. El crecimiento poblacional estimado, incluyendo el saldo migratorio, es de 2.138.481 personas en todo el periodo según refleja la figura 51 (Proyección de la Población, 2010).

Años	Población residente a 1 de enero	Crecimiento poblacional	
		Absoluto	Relativo (%)
2009	45.828.172		
2019	46.955.030	1.126.858	2,46
2029	47.517.722	562.692	1,20
2039	47.903.099	385.376	0,81
2049	47.966.653	63.555	0,13

Fuente: Proyección de Población a Largo Plazo

Fig. 51 - Crecimiento poblacional de España 2009-2049 (Proyección de la Población, 2010)

El crecimiento poblacional escogido como modelo de comportamiento demográfico debe agruparse en viviendas potencialmente ocupables según los parámetros estimados como tamaño medio del hogar que establece el mismo INE en sus informes. En su último dato, 2007, se establece un tamaño medio del hogar de 2,74 personas/hogar, reflejado en la figura 52 (Boletín informativo 2009).

Familia y hogares. 2001-2007

Principales indicadores

	2001	2007
Número total de hogares en España (millones)	13,5	16,3
Tamaño medio del hogar (número de miembros)	3,03	2,74
Edad media de varones al primer matrimonio	30,4	34,1
Edad media de mujeres al primer matrimonio	28,4	31,1
Matrimonios	200.057	204.772
Divorcios, separaciones, nulidades	105.534	137.510
Número medio de hijos por mujer	1,24	1,40
Gastos de consumo medio por hogar (euros)	20.879	32.001
Tasa de actividad masculina (%)	66,2	69,3
Tasa de actividad femenina (%)	40,4	48,9

Fig. 52 - Tamaño medio del hogar y número de hogares 2001-2007

(Boletín informativo 2009)

Posteriormente, dicha demanda de vivienda vacía hay que mayorarla debido a que un 15% de los hogares españoles poseen segunda residencia, mantenida en porcentaje en el último censo de población y vivienda de 2001, según muestra la figura 53 (Boletín informativo 2009).

Hogares según disponibilidad de segunda vivienda

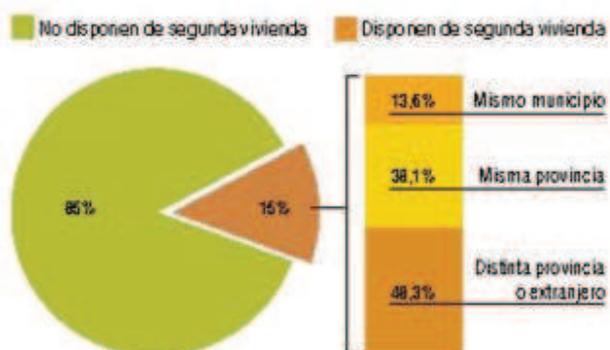


Fig. 53 - - Población que posee segunda residencia hasta año 2001

A la demanda de vivienda vacía anterior por familia, debemos añadir otra demanda de vivienda materializada en compraventa de vivienda por parte de ciudadanos extranjeros no residentes en España, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

1.- Por las ventajosas propuestas de venta en el actual mercado inmobiliario español, establecer una demanda mínima en los próximos años a razón de 16.480 viviendas por año. Dicho valor fue registrado en el pasado 2009, mayormente en segunda residencia, (Anuario 2011 de Estadística, 2012)

2.- 25.651 viviendas por año en concepto de incremento anual del 4,2%. Se han tomado como referencia los incrementos actuales sufridos en 2010 y 2011 que han sido de un 12% respecto al año anterior. Se ha considerado una función potencial de compra de vivienda en el periodo 2009-2049 simplificada en el incremento lineal propuesto.

El conjunto de datos obtenidos se reflejan en la tabla 5 a continuación,

Tipo de demanda anual aproximada	Número de viviendas
Crecimiento poblacional	19.511
Mayoración por posesión de 2ª residencia	2.926
Inversión extranjera no residente 2009	16.480
Incremento previsible demanda promedio	25.651
DEMANDA TOTAL ANUAL	64.584

Tabla 5 – Proyección de demanda de vivienda vacía 2009-2049. Elaboración por el autor.

Se acompañan en las figuras 54 y 55 datos del Anuario Estadístico Inmobiliario del Colegio de Registradores de la Propiedad para justificar los datos a introducir en el modelo como demanda de vivienda vacía.

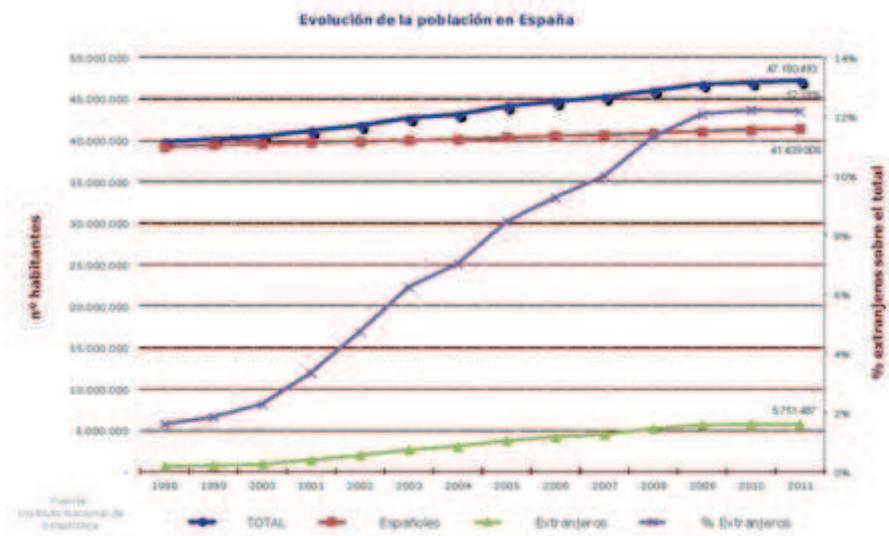


Fig. 54 - Grafica evolución de la población en España 1998-2011



Fig. 55 - Gráfica compraventas de viviendas periodo 2006-2011 realizadas por extranjeros

Mercado inmobiliario

Finalizada la estimación en la demanda potencial anual interna de los próximos 40 años parece necesario verificar la ocupación efectiva de vivienda vacía en un mercado tan grande y complejo como el inmobiliario. Para ello se ha dividido el problema en varios frentes:

Número de compraventas de vivienda realizadas en los últimos años

Dependiendo del origen, agentes intervinientes y tipo de inmueble tenemos una enorme casuística. Así pues, distinguiremos:

Por el tipo de inmueble

- Venta de viviendas de primera mano y VPO
- Venta de viviendas de segunda mano

Por residencia

- Destinado a primera residencia – vivienda principal
- Destinado a segunda residencia – vivienda secundaria

Por el comprador

- Nacional o extranjero residente
- Extranjero no residente

Por la razón social

- Persona Física
- Persona Jurídica

Tabla de número de Transacciones Inmobiliarias de Vivienda Libre y VPO												
	Año 2009				Año 2010				Año 2011			
	(trimestre)				(trimestre)				(trimestre)			
	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º
LIBRE 2º	43.289	52.385	50.491	66.242	57.879	78.415	52.736	90.143	45.725	57.268	48.484	59.567
MANO												
LIBRE	49.806	54.227	46.250	51.443	38.837	59.604	21.212	45.562	21.055	22.546	20.245	34.248
NUEVA												
VPO	11.608	13.326	10.793	13.859	10.363	15.145	6.602	14.789	7.675	10.942	7.805	13.558
NUEVA												

Tabla 6 – Compraventa de viviendas 2009-2011 según el tipo de inmueble. Elaboración por el autor.

Distinguiendo entre vivienda nueva y usada, en ambos casos se ha producido una intensa reducción del ritmo de compraventas. Concretamente, en vivienda nueva se registraron 184.530 compraventas, 43.003 menos que en 2010. En vivienda usada las compraventas registradas fueron 185.674, reducción en este caso también respecto al 2010, donde se formalizaron 32.678 compraventas más. La figura 56 establece la evolución de compraventas.

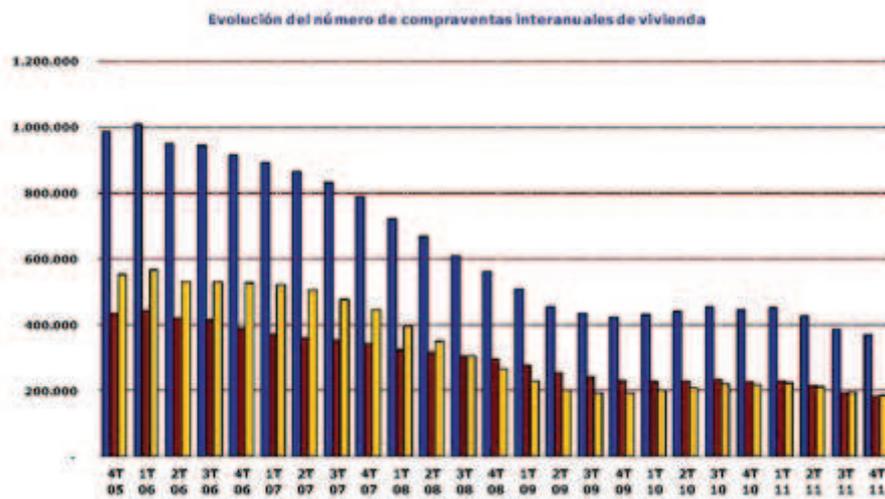


Fig. 56 - Gráfica evolución compraventa de viviendas 2005-2011 según el tipo de inmueble

Comprobado el descenso generalizado en las compraventas, es necesario entender que un gran porcentaje de la compra de viviendas no corresponde a la fundación de un nuevo hogar, sino que sirve de domicilio social a una persona Jurídica, o lo que es peor, resulta de la compra masiva de unidades por parte de las filiales de las entidades de crédito a ellas mismas, para paliar el balance anual de cuentas en el registro mercantil. Se adjuntan las cifras en la figura 57.

DISTRIBUCIÓN DE COMPRAVENTAS DE VIVIENDAS REGISTRADAS POR TIPO DE ADQUIRENTE (%). 2011		
CCAA	Personas físicas	Personas jurídicas
ANDALUCÍA	85,65%	14,35%
ARAGÓN	89,32%	10,68%
ASTURIAS	93,35%	6,65%
BALEARES	85,61%	14,39%
CANARIAS	82,48%	17,52%
CANTABRIA	87,99%	12,01%
CASTILLA Y LEÓN	93,12%	6,88%
CASTILLA-LA MANCHA	82,59%	17,41%
CATALUÑA	82,06%	17,94%
COM. MADRID	90,57%	9,43%
COM. VALENCIANA	84,59%	15,41%
EXTREMADURA	96,16%	3,84%
GALICIA	93,83%	6,17%
LA RIOJA	82,41%	17,59%
MURCIA	82,74%	17,26%
NAVARRA	94,10%	5,90%
PAIS VASCO	95,26%	4,74%
NACIONAL	87,23%	12,77%

Fig. 57 - Gráfica evolución compraventa de viviendas 2005-2011 según el tipo de inmueble

Parque inmobiliario y superficie media

Para la primera tarea, conviene verificar la difícil contabilización del parque actual de viviendas en España. Inicialmente se procede a la recopilación realizada hasta el censo de población y vivienda de 2001, para posteriormente estimar el parque según proyecciones y datos oficiales del INE (Estadísticas de construcción, 2009). Los resultados de la investigación se muestran en las tablas 7, 8 y 9.

Tabla de evolución del parque de viviendas en España hasta 2001

Año constr.	TOTAL	1	2	3	4	5 a 9	10 a 19	20 a 39	40 ó más
TOTAL	20.946.554	6.907.503	1.255.563	528.443	489.474	2.479.460	4.034.063	3.378.252	1.873.796
... - 1900	1.324.752	789.611	109.394	47.408	37.499	116.957	122.699	69.063	32.121
1900-1920	725.710	365.351	55.235	24.029	19.110	69.582	92.440	65.500	34.463
1921-1940	905.612	417.861	72.489	29.378	23.988	85.325	120.375	101.071	55.125
1941-1950	986.693	449.194	80.748	32.603	27.901	110.827	137.189	99.057	49.174
1951-1960	1.988.634	700.978	137.846	58.051	55.211	289.527	380.340	250.366	116.315
1961-1970	3.679.043	787.115	177.269	78.385	75.335	445.501	887.637	823.712	404.089
1971-1980	4.983.165	1.118.692	237.263	104.125	92.922	545.322	1.048.263	1.093.757	742.821
1981-1990	2.882.535	1.125.478	181.804	70.368	66.973	327.076	478.819	393.383	238.634
1991-2001	3.383.677	1.124.800	193.955	78.198	84.951	471.656	754.162	477.406	198.549
No aplic.	86.733	28.423	9.560	5.898	5.584	17.687	12.139	4.937	2.505

Tabla 7 – Evolución del parque de viviendas en España hasta 2001.

Elaboración por el autor.

tabla de licencias municipales para construcción

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
edif. de nueva planta								
_edif. a construir	144.576	145.048	167.138	184.278	203.377	230.044	187.147	93.678
residencial	128.874	129.279	150.064	166.180	184.218	208.631	166.322	79.752
no residencial	15.702	15.769	17.074	18.098	19.159	21.413	20.825	13.926
_sup. a construir	85.593	85.627	97.087	109.494	117.911	143.901	128.254	66.085
en edif. residencial	67.215	68.807	79.936	90.910	98.506	118.310	102.790	48.205
en edif. no residencial	18.378	16.820	17.151	18.584	19.405	25.591	25.464	17.880
_viviendas a construir	394.682	403.789	471.455	544.578	604.345	737.186	634.098	268.435

Tabla 8 – Estimación del parque de viviendas en España periodo 2002-2011.

Elaboración por el autor.

Tabla de viviendas proyectadas: obra nueva, ampliación y/o reforma

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Nº DE VIV.								
OBRA NUEVA	502.583	524.181	636.332	687.051	729.652	865.561	651.427	264.795
Unifamiliar	144.937	145.368	183.411	186.728	193.468	165.988	101.152	53.031
Viv. bloque	354.260	375.292	448.260	498.250	534.859	699.162	550.093	211.758
En otros edif.	3.386	3.521	4.661	2.073	1.325	411	182	6
A AMPLIAR	12.066	8.463	9.271	10.084	10.674	9.985	7.884	5.839
A REFORMAR	46.537	42.901	44.603	42.523	45.931	36.022	29.540	28.917
SUP. MEDIA POR VIV.								
OBRA NUEVA								
Unifamiliar	150,8	154,9	151,5	159	159,8	166	167,6	172,7
Viv. bloque	104,3	103,3	101,3	102,4	99,6	99,5	98,3	96,8
En otros edif.	102	97,9	95	107,2	98,4	97,8	101,2	147,5
A AMPLIAR	94,9	99,3	100,6	105,1	106,5	105,9	106,3	110,5

Tabla 9 – Viviendas proyectadas 2001-2008. Elaboración por el autor.

Considerando los datos anteriores, la tabla 10 muestra el conjunto parque edificatorio en España a fecha 1 de enero de 2009.

Tabla resumen sector inmobiliario España a fecha enero de 2009

Concepto	Viviendas
Parque de viviendas a enero de 2001	20.946.554
Viviendas terminadas enero 2001- diciembre 2008	4.104.363
Total parque inmobiliario	25.050.917
Viviendas proyectadas enero 2001- diciembre 2008	4.861.582
Licencias concedidas enero 2001- diciembre 2008	4.498.633
Viviendas pendientes de obtener licencia	362.949
Viviendas pendientes de finalizar la edificación	394.270

Tabla 10 – Tabla resumen parque actual de viviendas y proyecciones de posible stock.

Elaboración por el autor.

De la anterior tabla se deduce, además de la cifra en torno a la cual se mueve el parque de viviendas a fecha 1 de enero de 2009, la cifra en el entorno de 400.000 viviendas pendientes de terminar su proceso edificatorio, así como otras 360.000 pendientes de obtener la licencia de obra correspondiente. Probablemente éstas últimas verán su desarrollo en un futuro bastante lejano.

Por otro lado, el INE refleja en su censo de viviendas de 2001, las diferentes tipologías cuantificadas de vivienda, distinguiendo entre vivienda principal, secundaria, vacía, alojamiento y establecimientos colectivos. Se reflejan a continuación en las figuras 58 y 59 los datos publicados.

Viviendas según su tipo	
	Valores absolutos
Viviendas Familiares	20.946.554
Principales convencionales	14.184.026
Secundarias	3.360.631
Vacías	3.106.422
Otra tipo	292.332
Alojamientos	3.143
Establecimientos colectivos	11.446

Fig. 58 - Clasificación de viviendas según su uso hasta año 2001

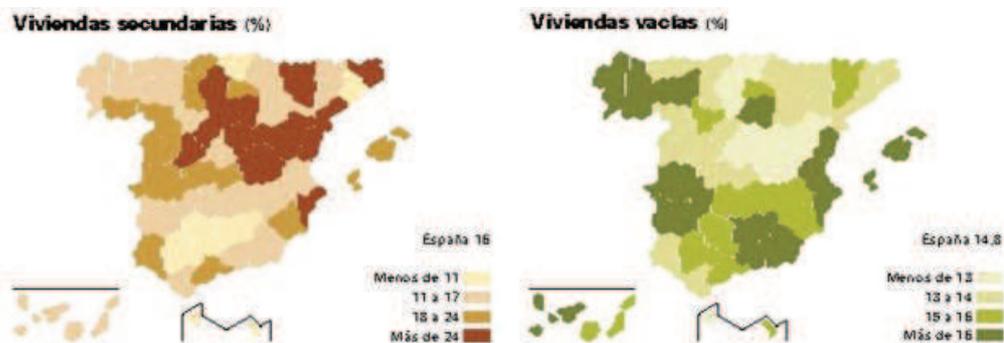


Fig. 59 - Clasificación de viviendas por provincias según su uso hasta año 2001

Por último, según datos del INE (estadísticas de construcción, 2009), resulta no menos interesante conocer la superficie media de la vivienda en España, especialmente a partir del año 1997, donde se empieza a producir la mayor parte del parque actual de viviendas. Para ello se ha elaborado la presente tabla, que refleja la superficie ponderada de la vivienda en España.

Tabla cálculo superficie media vivienda en España 1997-2008

Total vivienda unifamiliar	1.738.346	26%		
Total vivienda plurifamiliar	4.914.780	74%		
Total conjunto de viviendas	6.653.126	100%		
<hr/>				
Superficie media periodo			Ponderación resultado	
Vivienda unifamiliar	155,88	m ²	26%	40,73 m ²
Vivienda plurifamiliar	102,08	m ²	74%	75,41m ²
Total superficie media periodo 1997-2008				116,14 m²

Tabla 11 – Tabla cálculo superficie media vivienda España 1997-2008. Realizada por el autor.

Stock de viviendas

Caracterizado el parque inmobiliario, se procede a la evaluación del stock de viviendas. Esta variable está muy relacionada con la anterior y es uno de los datos más complicados de valorar en la investigación. Para obtener el máximo rigor en las consideraciones se han tomado datos oficiales del INE y Ministerio de Fomento, así como los anuarios de estadística registral inmobiliaria publicado por el Colegio de Registradores de la Propiedad en España. Las dos primeras fuentes carecen de un proceso de valoración objetivo, y no se han tenido mayormente en consideración, por la elevada dispersión en los resultados.

Se ha preferido iniciar el cálculo del stock estudiando en profundidad el ciclo de burbuja sufrido así como el inicio de absorción del stock por parte del mercado inmobiliario. Así pues, aún con el desfase que puede haber entre visado del proyecto de ejecución y la compraventa registrada de la vivienda, cifrado en la actualidad en siete meses aproximadamente, se establece como claro punto de cambio de tendencia el segundo trimestre de 2008. Por otro lado, el número de visados de vivienda

se ha estabilizado en unos 15.000 al trimestre, cifra que corrobora la hipótesis anterior que establece una cifra de aproximadamente 60.000 viviendas demandadas al año (Anuario 2011 de Estadística, 2012). Las figuras 60 y 61 muestran gráficamente al situación.

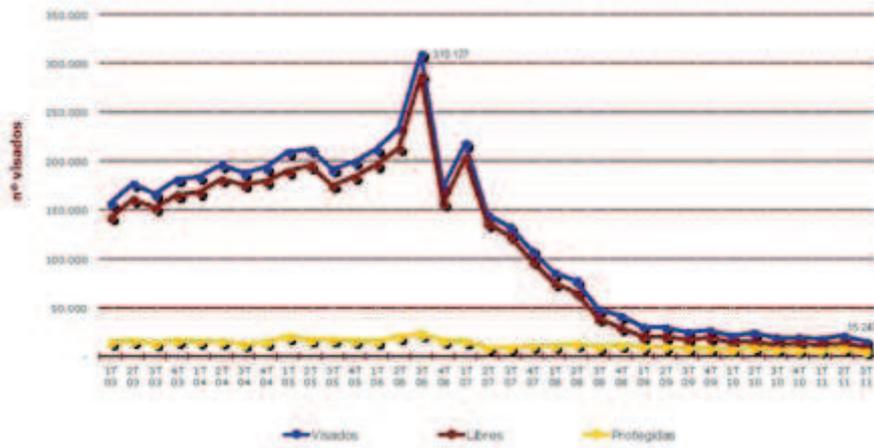


Fig. 60 - Gráfica evolución compraventa de viviendas 2005-2011 según el tipo de inmueble

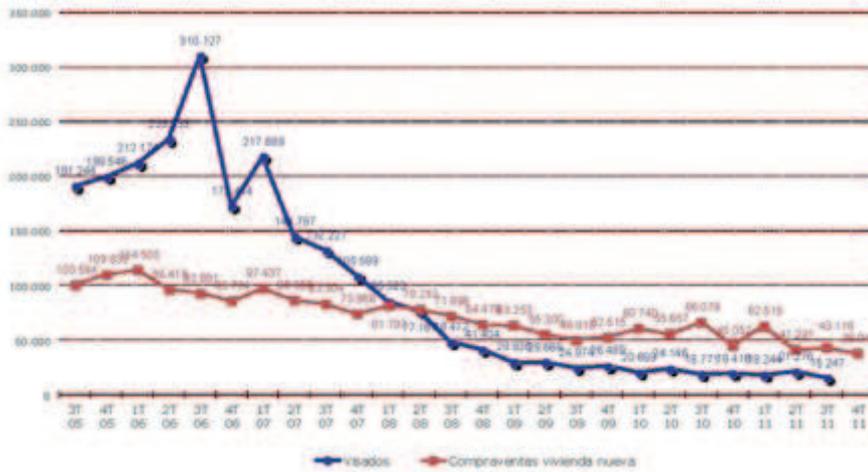


Fig. 61 - Gráfica evolución compraventa de viviendas 2005-2011 según el tipo de inmueble

Así pues, aún con el desfase que puede haber entre visado del proyecto de ejecución y la compraventa registrada de la vivienda, cifrado en la actualidad en siete meses aproximadamente, se establece como claro punto de cambio de tendencia el segundo trimestre de 2008. Por otro lado, el número de visados de vivienda se ha estabilizado en unos 15.000 al trimestre, cifra que corrobora la hipótesis anterior que establece una cifra de aproximadamente 50.000 viviendas demandadas al año. Por su parte, como ya se ha comentado anteriormente, el Ministerio de Fomento, en la elaboración del informe anual sobre el stock de vivienda nueva pendiente de venta, arroja los siguientes datos, basados en un modelo iterativo que consiste en añadir al stock del año anterior, las viviendas terminadas menos aquellas que no son susceptibles de venta, por referenciarse a autopromociones y cooperativas. Figuras 62 y 63.

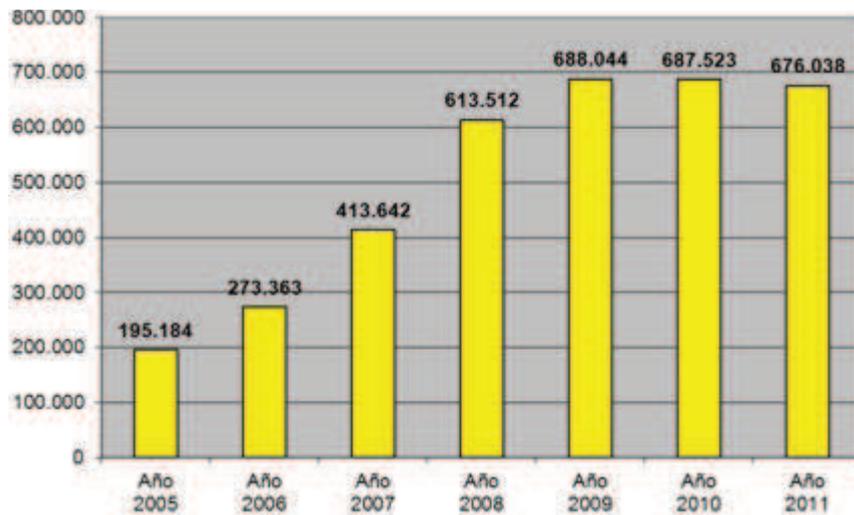


Fig. 62 - Stock de vivienda nueva pendiente de venta



Fig. 63 - - Stock de vivienda nueva pendiente de venta por provincia

Aunque finalmente, debemos recordar que el número de viviendas vacías no solamente incluye aquellas recientemente terminadas, sino aquellas que están pendientes de terminar, así como aquellas que sobre estar completamente terminadas, no se han registrado por motivos fiscales o económicos.

De todos modos, el informe que parece aglutinar en mayor medida este fenómeno corresponde al Observatorio Inmobiliario y de la Construcción (Verges, 2011) que establece los siguientes valores incluidos en la figura 64, medidos según el método de capital permanente con preferencia al método de mercado, dado que en la actualidad no lo hay, mucho menos en cuestión de suelo. Así pues, el dato incluye unidades de stock según su estado, pero no suelos en reserva por no tener datos suficientes. Las suposiciones que se han tomado para evaluar el stock son las siguientes:

1. Todas las viviendas iniciadas antes del tercer trimestre de 2002 sin excepción, están registradas al día de hoy.
2. Que el plazo medio entre visado de dirección de obra y registro era de siete trimestres en 2002 y que ha ido aumentando desde entonces debido al mayor tamaño de los proyectos (Verges, 2011).

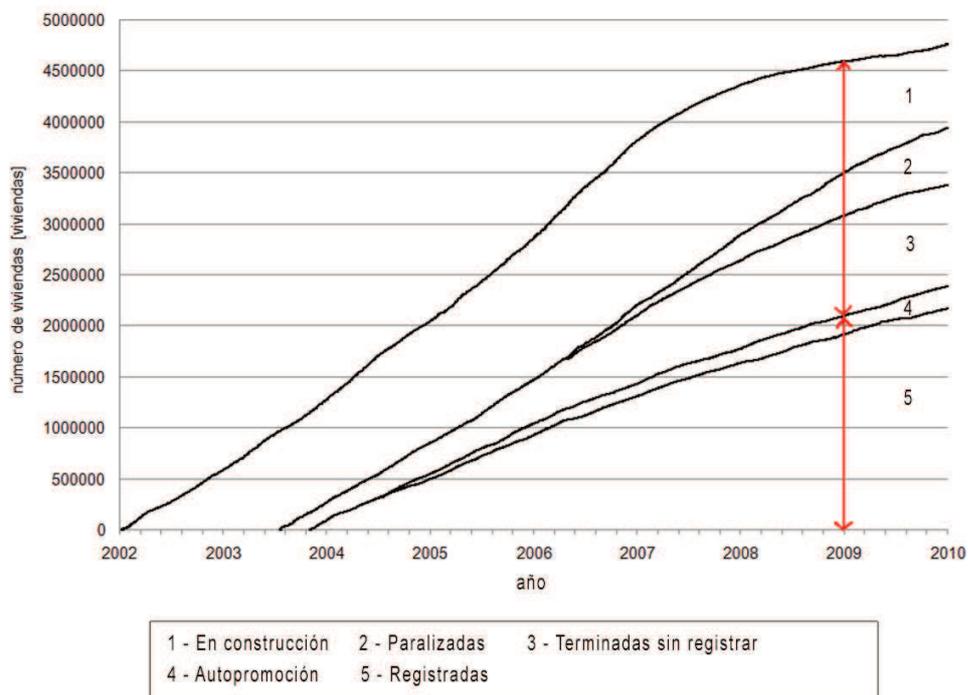


Fig. 64 – Stock de vivienda pendiente de venta. Imagen realizada por el autor.

Conviene señalar que el apartado “en construcción” determina aquellas viviendas pendientes de finalización pero con visado final de obra. La autopromoción se considera vendida si bien no es necesaria la inscripción de la obra terminada en el registro de la propiedad. Se consideran un 10% del total de compraventas registradas. Por tanto el stock de vivienda a fecha 1 de enero de 2009 es de 2.525.000 viviendas, desglosados del siguiente modo:

Tabla de stock completo de vivienda generado desde 2002.

Concepto a fecha 1 de enero de 2009	Número de viviendas
Stock completo de vivienda	2.525.000 viviendas
En construcción	1.100.000 viviendas
Paralizadas	450.000 viviendas
Terminadas o vendidas sin registrar	975.000 viviendas

Tabla 12 – Stock completo de vivienda generado desde 2002. Elaboración por el autor

Para calcular la demanda generada de madera en obra nueva en todo el sector edificación se presuponen las características constructivas y geométricas expresadas en la tabla 13, a efectos de calcular la demanda de madera contralaminada como sistema masivo en los cerramientos y la estructura de la vivienda. Partiendo de la superficie media de vivienda, se mayor la misma en concepto de cerramientos. En el cálculo del espesor se han tenido en cuenta las mermas de material.

Tabla cálculo volumen de demanda de madera por vivienda en obra nueva.

	Medición	Unidades
Superficie media vivienda España 1997-2008	116,14	m ²
Incremento por cerramientos y parte de tabiquería	1,50	---
Espesor medio elemento sustituyente	0,22	m
Volumen medio de material / vivienda	38,32	m ³ madera/vivienda

Tabla 13 – Cálculo volumen demanda de madera por vivienda en obra nueva. Elaboración por el autor

Demanda en rehabilitación de vivienda y demoliciones.

La última estimación de demanda potencial pasa por conocer la demanda en rehabilitación de vivienda. Para ello ha sido necesario estimar el futuro número de intervenciones por rehabilitación estructural o demolición parcial. Se han utilizado diversas fuentes para verificar la realidad de un sector muy difícil de cuantificar. De entre todas, las tablas que ofrece el Ministerio de Fomento en relación a la actividad rehabilitadora y de demolición en el sector construcción son las que ofrecen mayor aproximación al fenómeno. (Estadísticas de construcción, 2012)

El primer paso es lanzar la información obtenida, a través de las tablas elaboradas por el Ministerio de medio ambiente, medio rural y marino en relación a la estimación de los RCD's producidos por m² en España, para un cálculo aproximado de las estimaciones de años anteriores y de ese modo poder prever la dimensión y el alcance de este apartado. Figuras 65 y 66.

Tipo de construcción	RCD producido por m ² de edificación
Obras de edificios nuevos	120,0 kg/m ² construido
Obras de rehabilitación	338,7 kg/m ² construido
Obras de demolición total	1.129,0 kg/m ² demolido
Obras de demolición parcial	903,2 kg/m ² demolido

Fig. 65 – Estimación de los RCD's producidos por m² edificado en España

Tipo de obra	2001	2002	2003	2004	2005
Edificación:					
- obra nueva	10.270.920	10.274.640	11.649.720	13.139.640	14.149.080
- rehabilitación	914.490	865.040	1.006.278	1.010.342	909.748
- demolición total	4.493.420	4.399.713	5.444.038	6.446.590	7.860.098
- demolición parcial	1.147.064	1.122.678	1.231.965	1.360.219	1.297.898
- obras sin licencia	841.295	833.104	966.600	1.097.840	1.210.841
Obra Civil	6.543.403	6.479.649	7.518.000	8.538.752	9.417.654
Total RCD generados	24.210.592	23.974.824	27.816.601	31.593.383	34.845.319

Fig. 66 – Generación de RCD's según el tipo de edificación y obra civil en España

Sumando las cantidades anteriores podemos calcular la demanda total en m² a rehabilitar en elementos en su mayor parte estructurales procedentes de demolición parcial y rehabilitación. Se han adoptado las siguientes premisas para el cálculo:

- 1.- Se escoge el año 2005 como uno de los de mayor ejercicio de la actividad rehabilitadora como dato más desfavorable para los actuales cálculos y desarrollo del sector.
- 2.- Se supone una actividad económica plana debido a la carestía de crédito que parece será constante en los próximos años.
- 3.- Que el total de volumen de RCD's generado es exclusivo de elementos estructurales susceptibles de ser reemplazados por tablero de madera contralaminada.
- 4.- La superficie media de vivienda demolida es de 116,41 m², según tabla anterior entre los años 1997-2008.

De ese modo obtenemos la tabla 14, que muestra el número de intervenciones en materia de rehabilitación.

Tabla de demanda de vivienda según RCD's generados

Tipo de obra	Generación RCD's anual	RCD producido	Intervenciones	Intervenciones
	Kg	Kg/m ²	m ²	viviendas
Rehabilitación	909.748.000	338,7	2.685.999	23.127
Demolición parcial	1.297.898.000	903,2	1.437.000	12.373
totales			4.122.999	35.500

Tabla 14 – Demanda de vivienda según RCD's generados. Elaboración por el autor

Para cada intervención descrita en la parte superior en materia de rehabilitación, se ha considerado una necesidad de madera por vivienda rehabilitada según la tabla 15:

Tabla cálculo demanda volumen de madera por vivienda en rehabilitación

	Medición	Unidades
Superficie media vivienda España 1997-2008	116,14	m ²
Espesor medio elemento sustituyente	0,22	m
Volumen medio de material / vivienda	25,55	m ³ madera/vivienda

Tabla 15 – Cálculo demanda volumen de madera por vivienda en rehabilitación.

Elaboración por el autor.

Como bien se ha dicho anteriormente, tomando el problema por otras fuentes para verificar la realidad de un sector también éste muy difícil de cuantificar, se adjuntan a continuación las tablas que ofrece el Ministerio de Fomento en relación a la actividad rehabilitadora y de demolición en el sector construcción. La Tabla 16 muestra los datos de superficie afectada por ampliaciones y vaciados en edificios de viviendas así como las viviendas nuevas generadas por dicha actividad rehabilitadora. Todo esto por año consecutivo durante once años.

Tabla de licencias concedidas para obras de rehabilitación. Total nacional.

AÑO				AMPLIACIÓN		VACIADO	
	Nº DE EDIFIC.	SUPERF. (mil.m2)	VIVIENDAS CREADAS	Nº DE EDIFIC.	SUPERF. (mil.m2)	Nº DE EDIFIC.	SUPERF. (mil.m2)
2011	30.237	1.740	---	7.316	1.172	2.208	570
2010	31.910	2.761	---	8.826	2.203	1.936	557
2009	33.267	2.495	13.465	9.217	2.013	1.825	480
2008	34.807	3.582	16.984	11.423	2.887	2.345	696
2007	33.359	3.408	19.796	12.166	2.755	2.187	654
2006	35.856	3.282	23.128	13.727	2.476	2.912	806
2005	33.086	2.684	20.893	13.115	2.141	2.111	544
2004	32.229	2.982	21.099	12.932	2.298	2.437	685
2003	28.392	2.970	17.029	11.668	2.444	1.640	525
2002	27.336	2.556	13.980	11.985	2.072	1.608	485
2001	25.818	2.701	14.708	11.939	2.180	1.585	521
2000	25.727	2.837	14.147	12.052	2.254	1.583	585

Tabla 16 – Tabla resumen viviendas generadas en actividad rehabilitación. Elaboración por el autor.

En el modelo se genera una demanda de rehabilitación similar a 2008-2009, siendo ligeramente superior a la media del sector antes del estallido de la burbuja y considerando que puede ser uno de las grandes esperanzas en la actividad del sector. El número estimado es de 16.184 viviendas / año. Para el modelo propuesto se escogen asimismo los datos del Ministerio de Fomento, en clara determinación pesimista que genere un modelo más desfavorable. La tabla 17 muestra el total de intervenciones en materia de demolición total.

Estas viviendas quedan incluidas en la demanda de vivienda vacía mediante la variable *lv* por motivos de operatividad del modelo.

Tabla de licencias concedidas para obras de demolición. Total nacional.

DEMOLICIÓN TOTAL									DEMOLICIÓN PARCIAL		
EDIFICIOS A DEMOLER											
			SUPERFICIE				SUPERFICIE				
DEMOLICION		DEM.PREV.	A DEMOLER	VIVIENDAS	EDIFICIOS	A DEMOLER	VIVIENDAS				
AÑO	TOTAL	TOT. EXCL.	N. PLANTA	(miles m2)	A DEMOLER	AFFECTADOS	(miles m2)	SUPRIMIDAS			
2011	7.295	3.683	3.612	4.509	6.208	13.740	1.380	1.590			
2010	8.084	4.225	3.859	2.180	6.985	13.457	1.440	1.731			
2009	7.984	3.959	4.025	2.689	6.975	13.596	1.660	2.919			
2008	14.573	7.107	7.466	4.407	13.253	13.622	1.569	2.589			
2007	26.141	13.914	12.227	8.641	25.244	11.970	1.766	4.514			
2006	28.480	14.893	13.587	9.022	29.147	13.596	1.768	3.274			
2005	20.997	11.584	9.413	6.961	21.597	12.103	1.438	2.975			
2004	18.165	9.363	8.802	5.711	19.041	12.144	1.504	3.143			
2003	14.420	7.372	7.048	4.822	15.474	10.333	1.364	2.276			
2002	12.718	6.588	6.130	3.900	13.592	9.350	1.243	2.335			
2001	11.799	5.709	6.090	3.980	13.969	9.062	1.271	2.228			
2000	11.838	5.308	6.530	3.643	12.605	8.773	1.298	2.401			

Tabla 17 – Tabla resumen viviendas generadas en actividad rehabilitación. Elaboración por el autor.

Resultan de gran ayuda las anteriores tablas, dado que si bien las superficies estimadas son exactamente las mismas en el caso de rehabilitación y demolición parcial, las viviendas intervenidas son muy inferiores las reales que no las calculadas bajo el perfil de generación de RCD's. Es lógico dado que hay una elevada superficie de paramentos en la demolición no incluidos en el primer cálculo. Por tanto, se dan como válidas las previsiones del Ministerio de Fomento.

El sector de demoliciones, ya sean éstas totales o parciales, ofrece los siguientes datos globales en los últimos años validando las previsiones del Ministerio de Fomento. Para los próximos años se estima una actividad cercana a las 18.988 viviendas demolidas al año, considerando las actuales 10.000 viviendas / año como una actividad impropia del sector por la situación de elevada crisis actual. No se han tenido en cuenta el elevado número de demoliciones que producirá el ajuste del sector

inmobiliario (Estadísticas de la Construcción, 2012).

Por último, comentar que las intervenciones en materia de demolición total suponen un factor clave en la disminución de viviendas vacías en el mercado inmobiliario. Quedarán incluidas en la variable *tac*, muy sensible en el modelo planteado.

3.4.2 Producción forestal en España

Una vez examinada la demanda potencial de madera, conviene hacer un exhaustivo estudio sobre la disponibilidad en la producción de madera de conífera de los bosques españoles, haciendo hincapié en cada una de las variables que puedan afectar al modelo matemático.

Crecimiento natural en los bosques españoles

Los bosques de la Unión Europea almacenan 19.702 millones de m³ de madera, con una densidad media de 121 m³/ha. Tres de sus países acumulan el 39%: Suecia con un 15,8%, Francia con un 12,5% y Finlandia con un 11% son los mayores tenientes de madera.

España, con 921,9 millones de m³ de volumen de madera, es el octavo país de la UE-27 en existencias, con el 4,6% de la estimación total. Además España, con 27,5 millones de hectáreas, es el segundo país, detrás de Suecia, con mayor superficie forestal total de Europa: casi el doble de superficie forestal que Francia, y cerca del triple que Alemania (Montero & Serrada, 2013).

España con 18 millones de hectáreas arboladas, es el tercer país con más superficie boscosa de la Unión Europea, por detrás de Suecia y Finlandia. España aumenta su superficie arbolada a un ritmo anual del 2,19%, muy superior a la media Europea, que se sitúa en el 0,51%; de hecho es el país de Europa con mayor incremento de superficie de bosque, alrededor de 4,4 millones de hectáreas, que suponen aproximadamente 296.000 hectáreas/año -entre 1990 y 2005- aportando más del 40% del incremento del total europeo.

Posteriormente, se especifica qué especies en concreto y cuantos m³ producen cada una anualmente. Las especies coníferas, son todas ellas prácticamente aptas para el uso como paneles de madera contralaminada. La figura 69 expone dicho crecimiento forestal.

TIPO	Crecimiento VCC 1975		Crecimiento VCC 1996		Crecimiento VCC 2009		Ratio variación 1975-2009
	Mil m3/año	%	Mil m3/año	%	Mil m3/año	%	%
Coníferas	21.715	69	17.529	58	26.145	57	20,4
Frondosas	9.622	31	12.559	42	19.991	43	107,8
TOTAL.	31.337	100	30.089	100	46.136	100	47,2

Fig. 69 – Evolución del crecimiento anual del volumen de madera según coníferas y frondosas

El análisis de la evolución del volumen de madera almacenada en el monte entre el periodo 1975 y 2009 ofrece una conclusión también clara: en España cada vez hay más reserva de madera. Así, los bosques españoles han incrementado sus existencias arbóreas un 101,9% en poco más de 30 años, pasando de 456,7 millones de m³ a 921,912 millones m³.

De igual modo, la cantidad de madera almacenada por superficie arbolada se ha incrementado durante estas tres décadas en un 30,3% -38,7 m³/ha en 1975 frente a 50,5 m³/ha en 2009-. Es reseñable cómo la relación entre densidad de madera por hectárea arbolada y volumen total de madera ha ido disminuyendo a lo largo del periodo considerado.

Actualmente, *Eucalyptus globulus*, con el 17,6% del crecimiento anual de madera total de España, se ha convertido en la especie forestal con más posibilidad de corta del país; si además se suma el crecimiento de *Pinus pinaster*, con 17%, se obtiene más de un tercio del crecimiento total; estas dos especies forestales junto con *Pinus sylvestris* (12,7%), *Pinus radiata*(8,8%) y *Pinus nigra* (6,6%), llegan a sumar más de la mitad de todo el crecimiento anual maderable (62,7%). La figura 70 muestra dicha proporción.

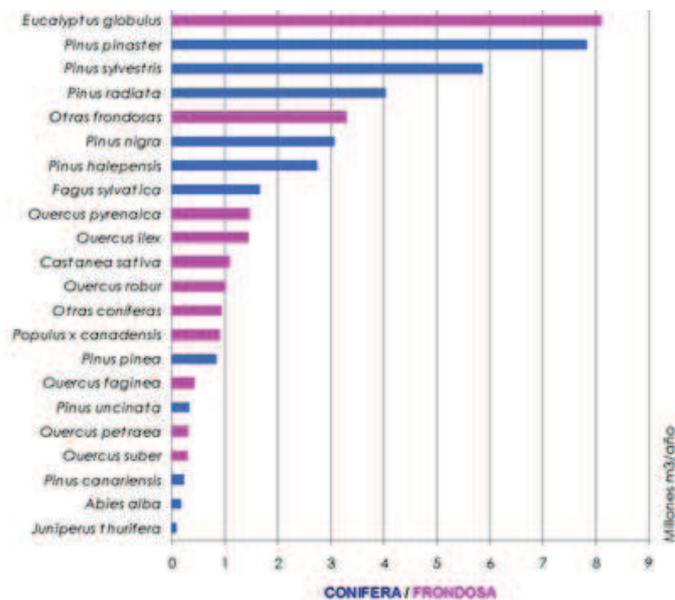


Fig. 70 – Crecimiento anual de madera por especie forestal principal

En cuanto a la variación registrada durante el periodo 1975-2009, destaca el incremento del crecimiento de *Quercus petraea*, en un 191% y de *Eucalyptus globulus*, en un 155%, así como el descenso de *Pinus radiata*, en un -22% y de *Pinus pinaster*, en un -16%.

Comparando los datos anteriores con referencias del INE, reflejadas en la tabla 18, encontramos una gran correlación en los resultados, que prevén un aumento de la masa forestal por superficie, disponible para suministro de madera.

Tabla de tierra forestal por superficie, año, disponibilidad y tipo de indicador.

	1995	1996	1997	1998	1999	2000
	sup. 1000 Has	sup. (1000 Has)				
Cambios por activ. Econ.	-13,38	-13,48	-16,69	-20	-23,4	-26,91
- Forestación	18,34	18,47	22,87	27,4	32,07	36,87
- Deforestación	31,72	31,95	39,56	47,4	55,47	63,78
Otros cambios	95,42	96,11	119	142,58	166,85	191,83
- Colonización natural	118,7	119,56	148,04	177,36	207,56	238,64
- Regresión natural	23,28	23,45	29,04	34,79	40,71	46,81
BALANCE FORESTAL TOTAL	82,04	82,63	102,31	122,58	143,45	164,92

Tabla 18 - Balance total forestal por superficie y tipo de indicador en España 1995-2000.

Elaboración por el autor

Sector maderero. Producción conífera. Expectativas

Producción de madera y leña

El balance entre el crecimiento neto anual de las masas forestales y las cortas que en ellos se realizan (posibilidad de corta sostenible) es un claro indicador cuantitativo de la sostenibilidad de la producción de madera y leña. Una norma básica de la técnica forestal sostenible es nunca extraer de las masas forestales por encima de lo que crecen: de esta forma se garantiza que el bosque siempre se incremente, que nunca disminuya.

Además, esta diferencia entre crecimiento y producción también expresa la capacidad actual y el potencial futuro de producción de nuestros bosques.

En la Unión Europea, se aprovecha de media cada año el 58,8 % del crecimiento de los bosques. Suecia, Bélgica y República Checa se aproximan, con valores por encima del 82%, a una tasa de aprovechamiento pleno.

España, con el 41,3 %, presenta unos valores muy inferiores a su posibilidad de corta sostenible. La figura 71 muestra los diferentes escenarios de corta en la UE-27



Fig. 71 – Tasa de extracción en la UE-27

Posteriormente, el 28% corresponde a volumen maderable por plantación en régimen de explotación pública o privada, según la figura 72.

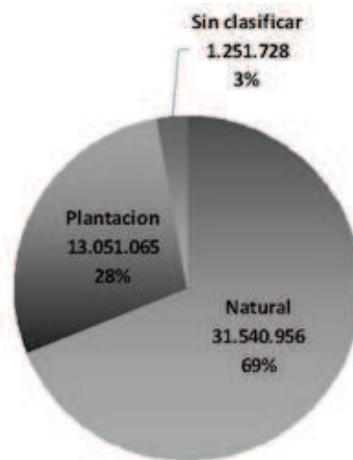


Fig. 72 – Crecimiento anual de madera según masas naturales y plantaciones

A esta tasa de extracción, hay que aplicarle un segundo coeficiente que representa el porcentaje atribuido a usos en edificación con un 36% de aprovechamiento centrado en trozas de aserrío y traviesas. El resto del material se puede aprovechar como material para postes y apeas de minas, otros usos industriales, tableros de viruta o de fibras, o bien para la formación de pastas, o bien su reutilización como biomasa (Situación de los bosques, 2010). (Figura 73)

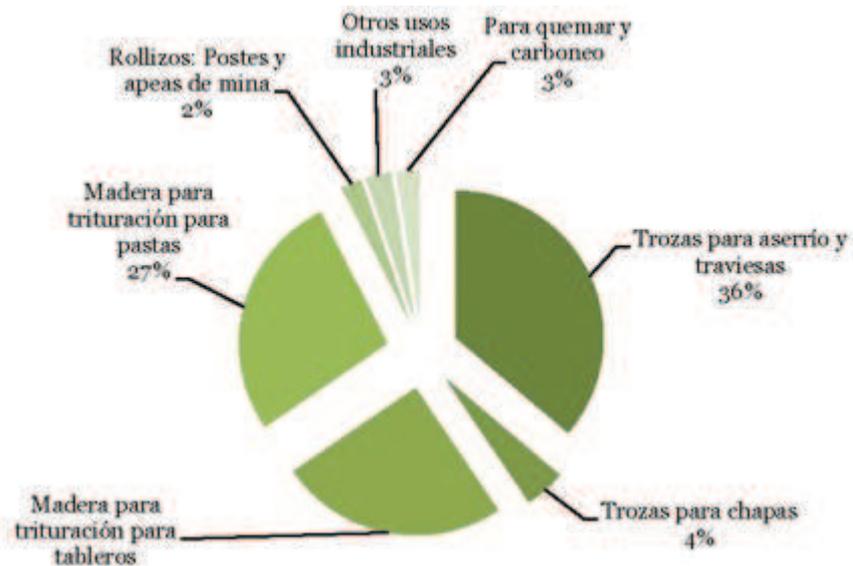


Fig. 73 – Producción de madera según destinos

Analizado el crecimiento natural de la superficie forestal arbolada, así como una posibilidad en la corta legal de la misma en la parte correspondiente a coníferas, se plantea también el uso real que se ha hecho de los bosques en materia de explotación económica.

De este modo, en el periodo 1990-2006 fueron talados 256.800.000 m³ VCC (volumen con corteza), a razón de 16.050.000 m³ VCC / año.

En 2009 la producción de madera y leña ascendió a la cantidad de 19.093.000 m³ VCC, con una tasa de extracción del 41,38%.

En cambio, en el mismo periodo, 2009, el consumo de madera fue de 31.066.000 m³ VCC, dejando una tasa de cobertura del sistema en el 61,46%, realizando necesariamente importaciones de madera de países extranjeros (Situación de los bosques, 2010). Figuras 74 y 75.

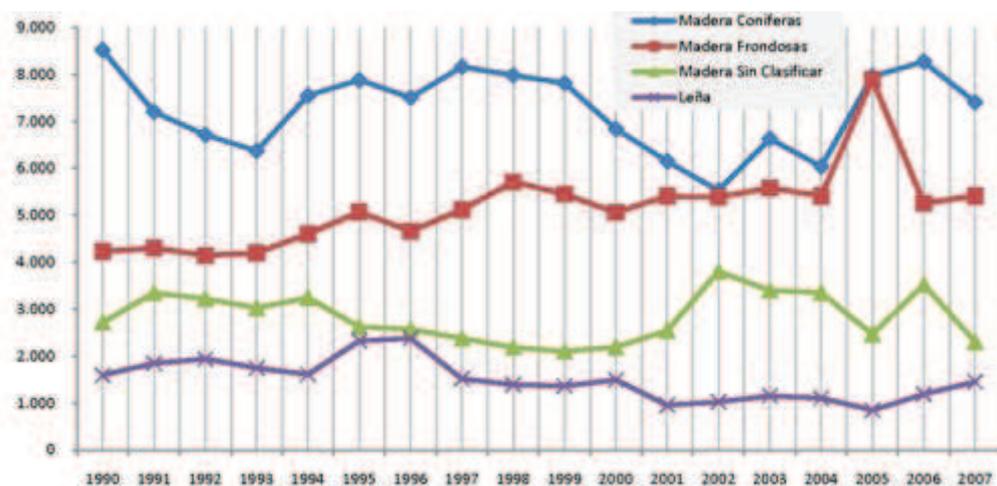


Fig. 74 – Evolución de producción de madera y leña 1990-2007. Miles de m³VCC.

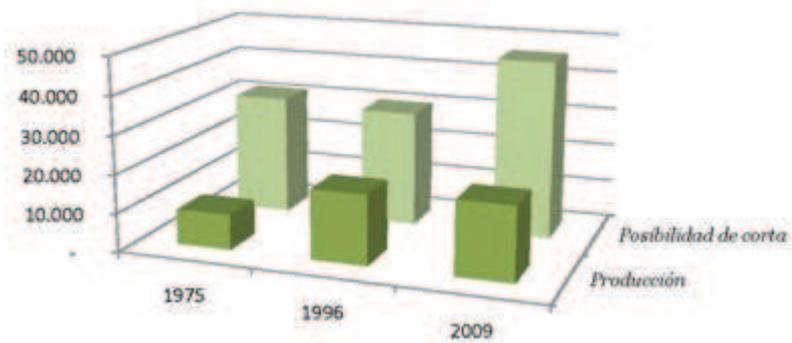


Fig. 75 – Gráfica posibilidad de corta sostenible

Las figuras 76 y 77 muestran respectivamente las los escenarios de corta de madera y producción de leña en España en los últimos años hasta 2005.

CORTAS DE MADERA					
AÑO	Coníferas (miles de m3 con corteza)	Fronchosas (miles de m3 con corteza)	Sin clasificar (miles de m3 con corteza)	TOTAL (miles de m3 con corteza)	Valor (miles de euros)
1990	8.517	4.229	2.714	15.460	523.806
1991	7.200	4.301	3.347	14.848	523.305
1992	6.711	4.142	3.221	14.074	471.945
1993	6.372	4.197	3.027	13.596	444.743
1994	7.549	4.601	3.244	15.394	536.499
1995	7.882	5.068	2.623	15.573	602.025
1996	7.507	4.662	2.571	14.739	595.719
1997	8.160	5.116	2.378	15.654	655.085
1998	7.981	5.710	2.183	15.874	685.953
1999	7.816	5.447	2.099	15.362	669.298
2000	6.838	5.058	2.193	14.090	627.945
2001	6.148	5.407	2.546	14.101	623.529
2002	5.525	5.382	3.806	14.713	666.321
2003	6.631	5.582	3.396	15.609	750.391

Fig. 76 – Cortas de madera 1990-2004 en miles de m3VCC

EXTRACCIÓN DE LEÑAS		
AÑO	PRODUCCIÓN (miles de estereos)	Valor en cargadero (miles de euros)
1990	3.381	27.358
1991	3.921	31.475
1992	4.110	38.284
1993	3.709	29.335
1994	3.415	39.108
1995	4.933	56.388
1996	5.044	49.891
1997	3.216	31.343
1998	2.949	48.255
1999	2.890	34.747
2000	3.169	38.060
2001	2.026	21.052
2002	2.173	27.969
2003	2.443	32.301
2004	2.346	10.515
2005	1.800	

Fig. 77 – Evolución de producción de madera y leña 1990-2007. Miles de m³VCC.

Tabla de consumo aparente de madera y leña en España

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Extracción							
Madera	11.615.056	11.230.589	10.706.898	10.682.338	10.634.839	9.784.303	9.211.252
Importaciones Madera	3.610.095	3.580.171	4.109.921	5.005.952	5.448.439	6.661.928	6.874.581
Exportaciones Madera	1.080.232	967.591	1.306.657	1.363.640	1.233.809	1.403.078	1.523.133
total anual existencias	14.144.919	13.843.169	13.510.162	14.324.650	14.849.469	15.043.153	14.562.700
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Extracción							
Madera	9.736.972	10.393.354	9.811.867	10.270.110	11.283.401	9.526.838	10.698.881
Importaciones Madera	6.142.241	6.481.309	6.805.983	7.269.136	7.213.961	7.481.427	6.085.954
Exportaciones Madera	1.583.217	1.511.348	1.646.907	1.760.437	1.848.267	2.030.620	2.342.405
total anual existencias	14.295.996	15.363.315	14.970.943	15.778.809	16.649.095	14.977.645	14.442.430
	Masa [t]	Densidad [kg/m3]	Volumen [m³ VCC]				
promedio periodo	14.768.318	500	29.536.636				

Tabla 19 - Consumo aparente de madera y leña en España 1995-2008

Los 29.536.636 m³VCC supondrían el balance neto de madera y leña en España en materia de existencias. Esta cifra deberá ser contrastada con los 31.066.000 m³VCC de consumo de madera referenciados en el informe de la Sociedad Española de Ciencias Forestales para 2009, para verificar su certeza o aproximación al fenómeno.

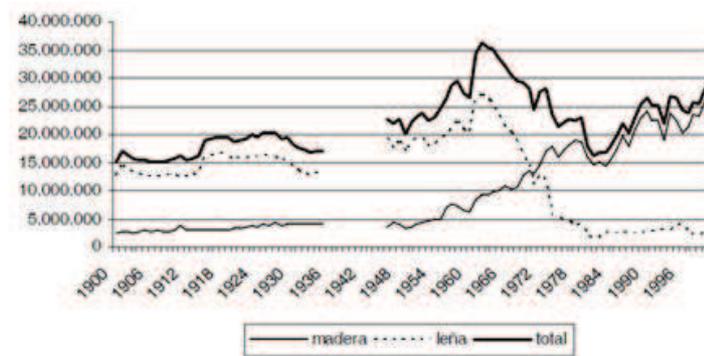


Fig. 78 – Consumo madera y leña en España 1900-2000

Como se puede apreciar en la figura 78 el consumo real que supone el aparente +/- el stock en el sector arroja una media desde 1995-2000 cercana a 28.000.000 que añadida a los últimos años, con una media cercana a los 30.000.000 m³VCC provoca que las existencias de madera talada sean especialmente bajas.

Para el modelo de simulación de esta investigación se supondrá un stock de madera talada equivalente a cero, como medida conservadora.

Por otro lado, la tasa de extracción del modelo propuesto conservará el actual modelo de explotación para la estrategia 1. En dicha estrategia se establece una tasa de extracción del 41,38% = $tap + tap2$.

Por último, la corta ilegal o no controlada de madera y leña destinada a autoproducción para abastecer calefacción, ACS y calor de cocción mediante productos procedentes de superficie forestal arbolada, también se pueden estimar constantes para el ciclo de cálculo estudiado. De este modo, se presupone un consumo de productos derivados de madera procedente de superficie forestal arbolada por parte de un conjunto numeroso de familias españolas con domicilio principal en la zona intermedia y rural según el INE con las siguientes premisas (De la Riva et al., 2008):(fig. 79)

-La utilización masiva para producción de calor se supone para un 30% de las familias.

-Un consumo de 5 m³VCC / año por familia.

De este modo, el valor de esta variable se fija bajo la fórmula:

4.841.088 viviendas x 30% = 1.452.326 familias x 5 m³ / familia y año = 7.261.630 m³VCC año

Clase de viviendas	Zonas Urbanas según el número de habitantes						
	TOTAL	> 500.000	100.001-500.000	50.001-100.000	10.001-50.000	Zona intermedia	Zona rural
Todas	20.946.554	3.055.999	3.706.453	1.629.185	4.206.695	3.930.072	4.418.150
	100,0	14,6	17,7	7,8	20,1	18,8	21,1
Principales	14.184.026	2.379.844	2.895.051	1.148.087	2.919.956	2.458.556	2.382.532
	100,0	16,8	20,4	8,1	20,6	17,3	16,8
Secundarias	3.360.631	227.761	252.815	198.876	544.314	749.687	1.387.178
	100,0	6,8	7,5	5,9	16,2	22,3	41,3
Vacías	3.106.422	415.053	496.736	259.606	692.621	647.996	594.410
	100,0	13,4	16,0	8,4	22,3	20,9	19,1
Otro tipo	292.332	33.217	61.777	22.512	49.396	72.564	52.866
	100,0	11,4	21,1	7,7	16,9	24,8	18,1

(*) La zona urbana es el conjunto de entidades singulares de población que tienen más de 10.000 habitantes; la zona intermedia, las que tienen de 2.001 a 10.000, y la rural, 2.000 o menos.

Fig. 79 – Distribución del parque de viviendas según número de habitantes del núcleo

Teniendo en cuenta que la producción actual de leña y madera sin clasificar está, como medida conservadora, en el entorno de 4.000.000 m³ VCC/año para 2009 (Estadísticas de la construcción, 2009) se puede sostener una tala no controlada en el entorno de 3.261.630 m³VCC.

Este dato se introduce como tasa del 11,35% de la producción natural anual para producir un efecto desfavorable en el crecimiento natural.

Se ha tenido en cuenta que un incremento en la producción natural puede incrementar la autoproducción del sector privado.

Por último, resaltar que el modelo en su estrategia 1, plantea una tasa de extracción de madera conífera para uso estructural del 41,38%, equivalente a la madera talada en 2009 en España. De este modo, se propone absolutamente un crecimiento del bosque sostenible sin que la actuación del hombre sea determinante en el mismo.

Dicha tasa de extracción del modelo se divide a su vez en dos:

tap – equivalente a la tasa de extracción anual de conífera para uso estructural. Se obtiene multiplicando a la tasa de extracción (0,4138), el porcentaje de conífera con respecto al total crecido anualmente (0,4861), así como el porcentaje utilizado únicamente como aserrío (0,36) = 0,07242

tap2 – equivalente al resto de producción maderera para el resto del sector. Para una tasa de extracción del 0,4138, corresponde un valor de *tap2* de 0,3414

3.4.3. Variables modificadoras de la producción maderable en España

Una vez analizada la producción forestal a través de los indicadores referenciados, podemos realizar las siguientes afirmaciones que servirán para la generación del modelo matemático.

Producción forestal

La producción forestal arbolada en 2009 se situó en 46.136.000 m³ VCC

El crecimiento de la superficie y volumen arbolados, supone actualmente alrededor del 5% del total arbolado. De esa cantidad:

- El **6,65%** corresponde a repoblación forestal de años anteriores.
- El **65,35%** corresponde a crecimiento natural de los bosques.
- El **28,00%** restante corresponde a plantación humana.

Crecimiento natural de los bosques

La superficie forestal arbolada de los bosques españoles es de 18.578.624 Ha, mientras que el volumen de madera estimado está en torno a los 927.761.315 m³VCC, obteniendo una media aproximada de 49,94 m³ / Ha.

El volumen de plantación en 2009 fue de 144.170.000 m³VCC, alrededor del 12,56% del total forestal nacional. Sufre un crecimiento exponencial desde hace más de una década.

La plantación por parte del hombre no depende directamente de factores naturales, sino de ciclos económicos, si bien se puede estimar un valor determinista concreto. Se cifra en 12.918.080 m³VCC / año, equivalentes al 28% del crecimiento natural anual.

El crecimiento natural de los bosques depende de las condiciones climáticas y el volumen de madera total, que produce un efecto retroalimentador en el sistema. A partir de un volumen determinado de madera en los bosques españoles se activa el crecimiento por motivos climáticos. De no llegar al mismo, se penaliza ligeramente el sistema. Dicho límite se encuentra en los datos que ofrece la repoblación hidrológica forestal en España.

Repoblación forestal

Dicha repoblación la establece el PNAP -Plan de Actuaciones Prioritarias en materia de Restauración Hidrológico Forestal, Control de la Erosión y Defensa contra la Desertificación. De ese modo se considera:

-Superficie a repoblar, prácticamente la misma superficie actual arbolada, 18.400.000 Ha, de las cuales,

-6.217.830 Ha se consideran prioritarias en la repoblación. Es ésta cifra la que supone un cambio en las condiciones climáticas favorables para la generación de más masa arbolada. Supondría un aumento en las existencias de 310.891.500 m³VCC.

De este modo, alcanzada la suma de 927.761.315 + 310.891.500= 1.238.652.815 m³VCC, se considera un efecto favorecedor del crecimiento natural del 0,5% en volumen. De no alcanzarlo, el efecto penaliza con una tasa del -0,015% en volumen (Situación de los bosques, 2010).

Reforestación de los bosques

La reforestación realizada en España en los últimos años se sitúa en 61.295 Ha / año, que representan alrededor de 3.064.750 m³VCC / año, es decir, el 6,65% del total anual. La media de los últimos 66 años se sitúa por encima de este valor, sobre los 74.182 Ha./año. Se puede decir que es más o menos constante en el tiempo, y depende de políticas de desarrollo de la misma en mayor medida, y en menor medida de factores climáticos favorables (Situación de los bosques, 2010).

CC.AA.	1940-1982	1994 (solo FAC)	1995 (solo FAC)	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2006	Total
Andalucía	756.711	4.709	20.159	80.733	93.873	34.139	-	14.940	-	-	4.663	16.530	1.015.878
Aragón	237.942	760	2.280	1.355	3.261	921	1.390	1.211	2.248	2.081	1.700	1.793	257.662
Asturias	85.642	1.885	1.922	4.552	2.095	2.735	1.663	3.049	2.501	2.104	1.948	1.340	111.407
Baleares	1.597	0	501	322	118	299	70	55	2	-	162	271	3.391
Canarias	31.955	0	0	269	239	125	189	368	-	-	423	155	35.423
Cantabria	45.841	0	0	294	901	1.549	690	354	422	1.054	756	1.086	52.947
Castilla y León	454.091	31.498	22.959	33.081	32.395	29.491	-	11.936	13.531	22.691	28.848	21.010	781.731
Castilla La Mancha	282.303	6.990	14.951	29.280	26.656	32.023	18.313	19.405	3.692	5.809	9.048	22.451	470.626
Cataluña	64.250	12	843	1.022	825	458	-	0	500	457	1.008	534	99.729
Extremadura	201.549	854	9.603	27.075	17.857	18.998	35.537	20.939	5.226	993	3.747	10.484	322.864
Galicia	402.878	0	994	14.077	32.458	32.705	11.785	22.993	14.968	4.084	6.866	13.812	547.621
La Rioja	39.517	48	227	666	473	2.112	1.309	1.442	1.185	-	2.707	1.745	51.491
Madrid	39.063	1.872	907	3.974	1.954	2.839	-	1.800	1.208	2.425	1.839	2.580	58.484
Murcia	68.583	1.698	1.184	8.103	1.347	2.698	1.936	131	5	-	70	69	85.794
Navarra	3.200	180	142	1.277	1.164	2.493	-	0	-	923	1.268	947	11.904
País Vasco	24.911	3.559	2.176	11.571	8.922	9.850	10.289	12.366	13.082	7.989	3.429	3.632	111.877
Valencia	124.932	2.952	448	5.343	3.609	2.973	972	207	973	-	8.040	2.641	150.959
Reforestación provincias celtas	31.491	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31.491
ESPAÑA	2.914.681	27.028	79.394	222.421	217.320	176.788	129.898	123.010	79.794	68.292	71.580	100.861	4.271.881

Fig. 80 – Tabla resumen reforestación superficie forestal España por Comunidades 1940-2006

Incendios forestales

La media de los últimos 20 años en incendios forestales se sitúa en 154.864 Ha / año, de las cuales el 38,50% corresponden a superficie arbolada, o sea, 59.637 Ha /año, o lo que es lo mismo, 2.981.850 m³VCC. Si bien el número de siniestros es de un orden de magnitud a décadas anteriores, el tamaño de superficie arbolada quemada es muy inferior. La figura 81 muestra la relación inversa entre superficie quemada y numero de siniestros a medida que avanzan los años. (Los incendios forestales en España, 2010).

Se puede estimar que el número de incendios y la superficie arbolada incendiada anual es un valor proporcional dependiente de la producción forestal arbolada anual de madera, en modo de frenar proporcionalmente su crecimiento. Se cifra en un 10,38% de la producción natural.

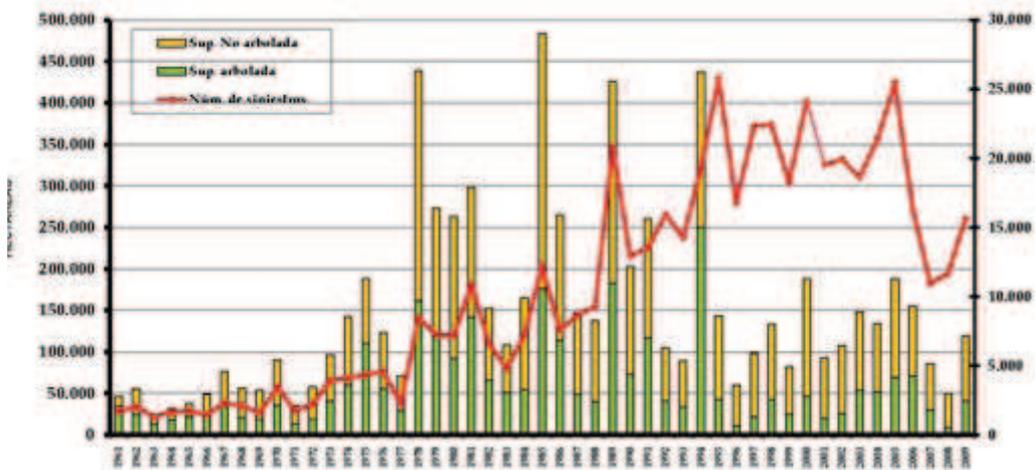


Fig. 81 – Evolución de siniestros y superficies afectadas en España 1961-2009





**4. MODELO DE SIMULACIÓN
POR ELEMENTOS FINITOS DEL
COMPORTAMIENTO ESTRUCTU-
RAL DE LA MADERA CONTRALA-
MINADA UTILIZADA COMO LOSA
BIDIMENSIONAL.**



4.1. Interpretación de la ortotropía en EF mediante análisis lineal en láminas.



Las láminas en el programa ANGLE (Alonso, 2015) se forman uniendo el comportamiento de membrana y el de placa a flexión.

En el elemento de membrana se ha implementado la formulación de Felippa (Bergan & Felippa, 1985) del triángulo con rotación en los nodos. La flexión de placa se formula con el triángulo discreto de Kirschoff denominado DKT.

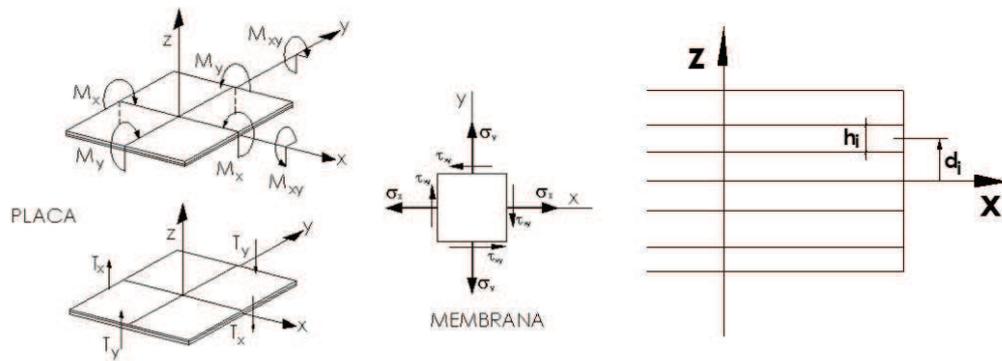


Fig. 82 - Esfuerzos en placa y cálculo por láminas discretizado según configuración de ortotropía

Para el desarrollo de la presente tesis se ha implementado en el programa ANGLE (Alonso, 2015) el cálculo de láminas por capas para modelizar las diferentes capas de la madera contralaminada.

La matriz de rigidez de los elementos planos se obtiene sumando la rigidez de cada capa de la lámina, según la expresión:

$$k_e = \sum_{i=1}^{capas} \int_{Area} B^T D_i B \cdot t_i \cdot dA$$

Siendo :

D_i La matriz constitutiva del material de la capa i. Considerando la ortotropía de la madera.

d_i La distancia de la capa i al eje medio de la placa.

t_i Espesor efectivo de la capa i.

Para el efecto de membrana es el espesor real de la capa. $t_i = h_i$

Para el efecto de flexión de placa el espesor efectivo en función del espesor real y de la distancia de la capa al eje es,

$$t_i = \sqrt[3]{h_i^3 + 12h_i d_i^2}$$





4.2. Validación del modelo de EF en paneles de madera contralaminada.



4.2.1. Comportamiento estático. Ensayo a flexión.

La primera fase para la validación del modelo de cálculo descrito en el apartado anterior, tratará de comparar dos ensayos estáticos realizados sobre dos tableros de madera contralaminada.

Para el primer caso se ha elegido el ensayo incluido a flexión simple en un conjunto de ensayos (Saavedra Flores et al., 2015) que analizan una muestra de panel de madera contralaminada de 2,4m de largo por 1,2m de ancho, compuesto de tres laminas de 40mm de espesor cada una, según se describe en la figura siguiente. Las láminas exteriores están compuestas por tablas orientadas en la dirección mas larga del tablero, mientras que en la lámina intermedia, las tablas están colocadas perpendicularmente.

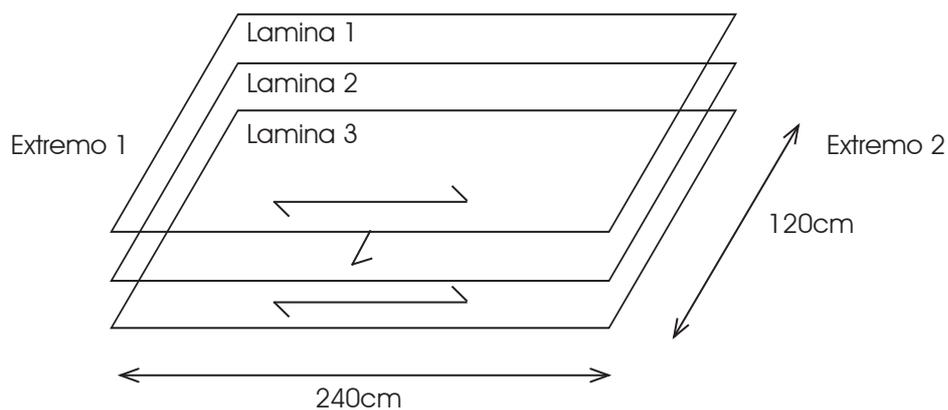


Fig. 83 - Composición y dimensiones tablero utilizado como muestra

La especie de madera utilizada en la experimentación es pino radiata procedente de Chile. Se han tomado para la validación del modelo las siguientes características mecánicas, obtenidas como la media aritmética de la población de muestras utilizadas. Las figuras siguientes muestran la obtención de dichos parámetros.

Tabla caracterización mecánica de la muestra utilizada		
muestra	Módulo de Young (MPa)	Densidad (Kg/m ³)
M-1	8.470	444

Tabla 20 - Caracterización mecánica de la muestra utilizada en flexión simple

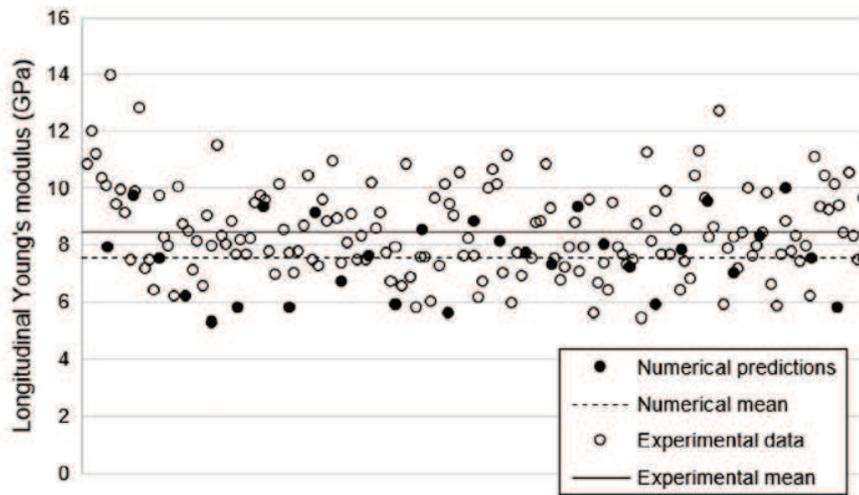


Fig. 84 - Obtención experimental del modulo de deformación. (Saavedra Flores et al., 2015)

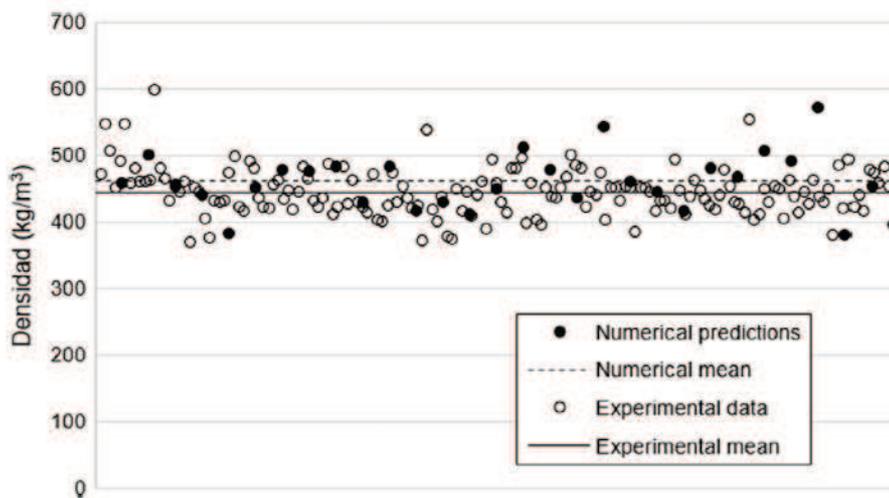


Fig. 85 - Densidades de la población de muestras en experimentación (Saavedra Flores et al., 2015)

Las anteriores figuras permiten observar la media así como la desviación típica para justificar el numero de muestras tomado para la validación del modelo. De entre los ensayos a los que se sometió en la experimentación el tablero de madera contralaminada utilizaremos el de flexión simple aplicada en cuatro puntos. La siguiente figura muestra fotografía del ensayo realizado (Saavedra Flores et al., 2015).



Fig. 86 - Ensayo a flexión a cuatro puntos realizado sobre madera contralaminada.
(Saavedra Flores et al., 2015)

Presentado el modelo y la experimentación realizada en la investigación citada, se procede a la obtención de los resultados del modelo para su comparación con los resultados obtenidos en el campo experimental y poder validarlo.

El modelo nos permite simular el comportamiento del material sometido a evaluación como si se tratase de un material isótropo, o bien generar cada una de las láminas que componen el tablero. De este modo dispondremos de una variable añadida que supone la comparación entre el modelo isótropo y su respuesta en madera contralaminada para evaluar la relación entre ambos.

Una vez designada la caracterización mecánica del material, toman un valor clave las condiciones de contorno del ensayo experimental realizado. Para realizar el modelo mas cercano a la realidad experimental, se ha modelado el material como sólidos en tres capas, efecto que produce un desfase del eje del tablero, necesario para calibrar las deformaciones.

Posteriormente, este modelo tridimensional se compara con el modelo de placa, el cual viene dividido en laminas, según se ha descrito en apartados anteriores mediante la programación desarrollada. En este ultimo caso, se desplaza el modelo, mediante la aplicación en los apoyos del tablero, de un elemento finito de placa del mismo material, de altura igual a la mitad del canto del tablero, eje real sobre el cual se aplica la carga.

Para cada modelo, elementos tridimensionales y de placa, se realizan tres configuraciones, según el tipo de apoyo en cada uno de sus dos extremos. La siguiente tabla refleja dichas configuraciones. Para el caso del extremo 2, se ha tomado un apoyo donde se consideran libres los giros, fijo los desplazamientos en las direcciones transversal y perpendicular al plano del panel, mientras en la dirección longitudinal del panel se incluye una constante de rigidez diferente.

Tabla configuraciones de apoyos en ensayo a flexión simple		
	Extremo 1	Extremo 2
CLT 1	Rótula	Cte. rigidez 11.000 Kp/cm
CLT 2	Rótula	Cte. rigidez 15.000 Kp/cm
CLT 3	Rótula	Cte. rigidez 7.000 Kp/cm

Tabla 21 - configuraciones de apoyos en ensayo a flexión simple

En las figuras siguientes se muestran los estados de deformaciones mediante isovalores para el modelo empleado, bien sea con elementos finitos tridimensionales, bien con elementos finitos en modelo de placa.

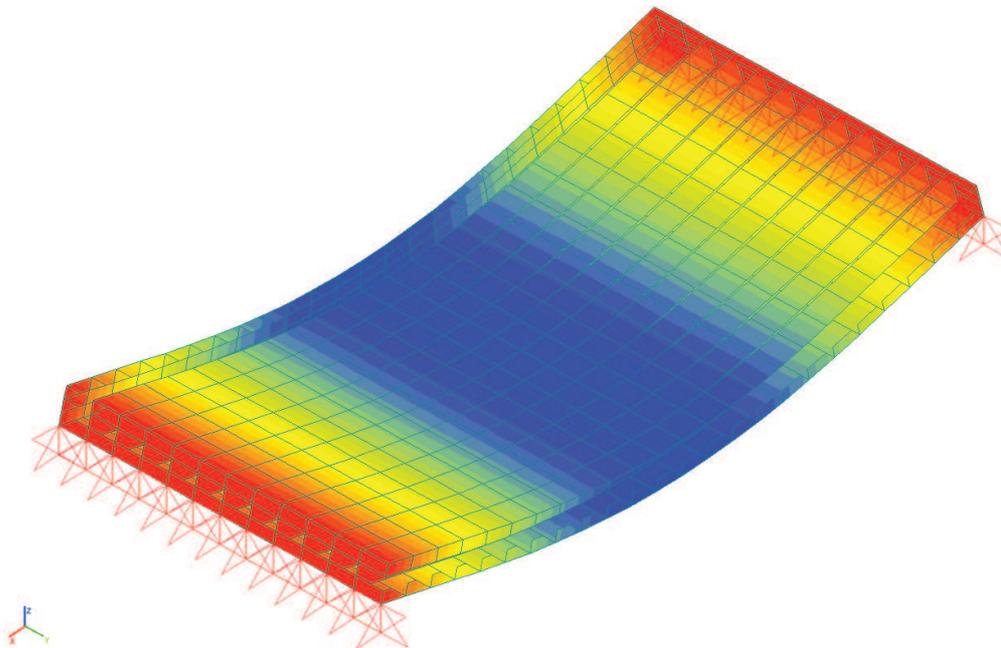


Fig. 87 - Estado de deformaciones producido en ensayo a flexión simple. Modelo EF tridimensionales.

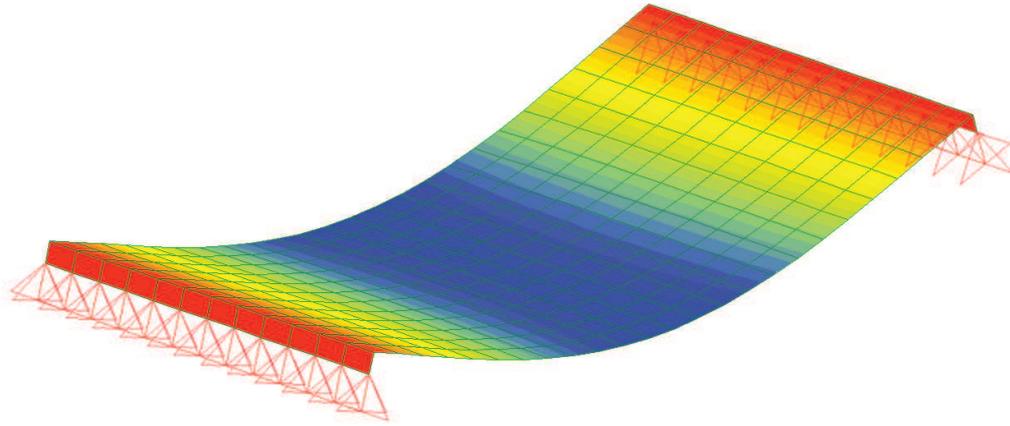


Fig. 88 - Estado de deformaciones producido en ensayo a flexión simple. Modelo EF placa.

Los resultados obtenidos se resumen en las siguientes figuras, que permiten comparar los resultados experimentales con la simulación realizada, así como la diferenciación entre el comportamiento isotrópico y de la madera contralaminada.

4.2.2. Comportamiento estático. Ensayo a compresión

Para el segundo caso se ha elegido un ensayo a compresión (Blab & Flaig, 2015) que analizan una muestra de panel de madera contralaminada de 1,2m de largo por 0,6m de ancho, compuesto de seis laminas de entre 40 y 20 mm de espesor, según se describe en la figura siguiente. Las láminas exteriores están compuestas por tablas orientadas en la dirección mas larga del tablero, mientras que en las láminas intermedias, las tablas están colocadas perpendicularmente.

La especie de madera utilizada en la experimentación es pino radiata procedente de Chile. Se han tomado para la validación del modelo las siguientes características mecánicas, obtenidas como la media aritmética de la población de muestras utilizadas. Las figuras siguientes muestran la obtención de dichos parámetros.

Tabla caracterización mecánica de la muestra utilizada			
muestra	Módulo de Young (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Composición Tablero L-T-L-L-T-L
D600REF	12.016	446	40-20-40-40-20-40

Tabla 22 - Caracterización mecánica de la muestra utilizada en compresión.

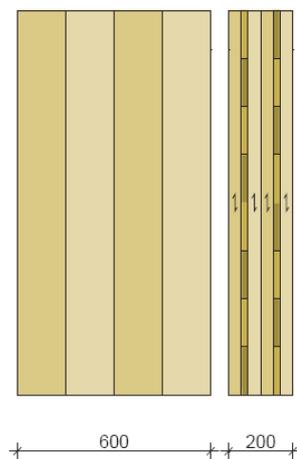


Fig. 89 - Composición y dimensiones tablero utilizado como muestra a compresión. (Blab & Flaig, 2015)

En este caso se ha supuesto un empotramiento en la base del panel, mientras que en la parte superior se ha simulado una viga de acero sin densidad donde se aplica la carga distribuida. En las figuras siguientes se muestran los estados de deformaciones mediante isovalores para el modelo empleado, bien sea con elementos finitos tridimensionales, bien con elementos finitos en modelo de placa.

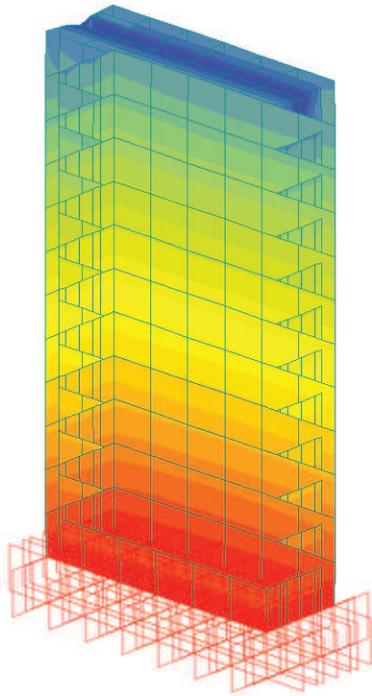


Fig. 90 - Estado de deformaciones producido en ensayo a compresión. Modelo EF tridimensionales.

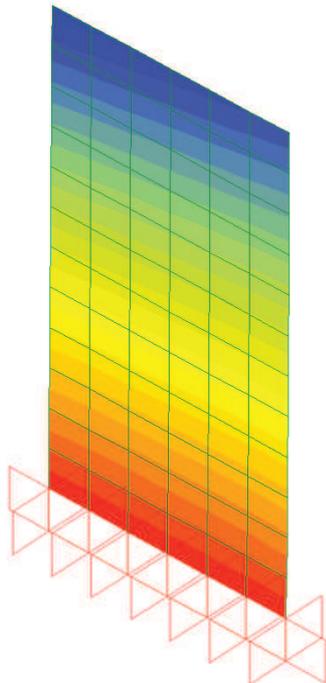


Fig. 91 - Estado de deformaciones producido en ensayo a compresión. Modelo EF placa.



4.3. Discusión de resultados



Los resultados anteriores demuestran la validación de un modelo de elementos finitos para sistemas de placa en madera contralaminada. Para realizar una correcta discusión de los resultados conviene separar los dos tipos de ensayos utilizados.

En el primer caso, el ensayo de flexión, utilizando unas condiciones de contorno similares a las del ensayo, el gráfico muestra su completa inclusión en el campo de resultados sobre la población de muestras utilizada, con valores que difieren un 1,8% respecto de los experimentales.

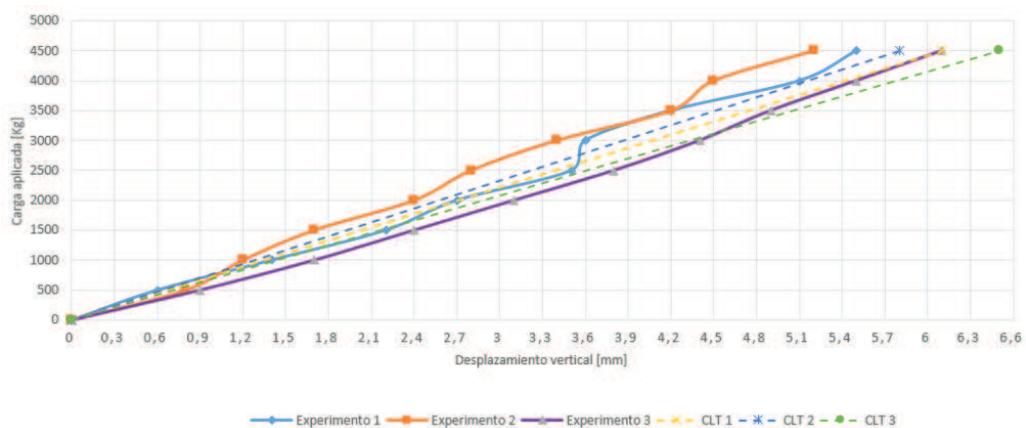


Fig. 92 - Comparativa en ensayo carga-deformación entre modelo experimental y modelo virtual en madera contralaminada. Modelo EF sólidos.

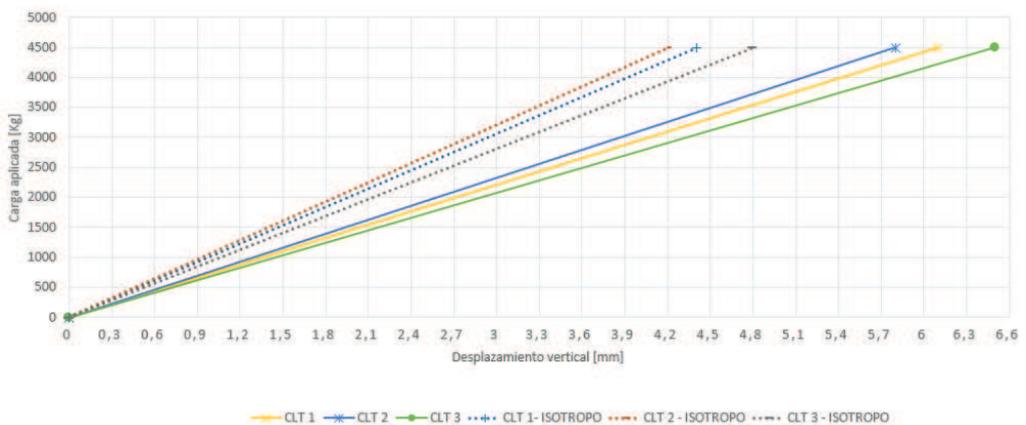


Fig. 93 - Comparativa en ensayo carga-deformación entre modelo virtual en madera contralaminada y modelo virtual con madera isotropa. Modelo EF sólidos.

Interesante resulta la comparación entre un sistema de madera contralaminada en comparación con un material modelo compuesto de madera, pero con comportamiento isótropo.

En este caso podemos observar una mejora en el comportamiento a deformaciones, pero de un calibre mínimo, dado que reduce la flecha producida en el centro del vano entre un 3.2 y un 3,7%.

Dicha minúscula mejora, considerando una respuesta isótropa del material, se entiende gracias a que un ensayo a flexión simple, en la dirección principal del panel, dado que las caras mas solicitadas son las exteriores, y éstas se hallan en dicha dirección, la respuesta es similar en ambos casos.

Para el caso de los sólidos sucede algo similar, si bien con las condiciones de contorno impuestas, el modelo muestra deformaciones un 8,9% mayores que el respectivo modelo de placa, en las tres configuraciones propuestas.

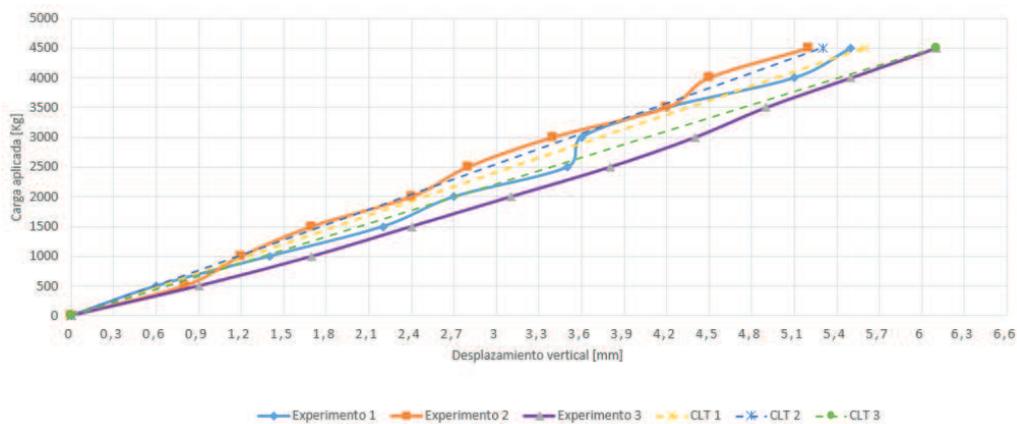


Fig. 94 - Comparativa en ensayo carga-deformación entre modelo experimental y modelo virtual en madera contralaminada. Modelo EF placa.

En cambio, el comportamiento isótropo de los elementos finitos tridimensionales mejora respecto del modelo de placa bajo material isótropo, en un 18,5% en todos los casos. Dicha mejora se interpreta como una mayor rigidez establecida entre los elementos 3D respecto de los elementos 2D de placa.

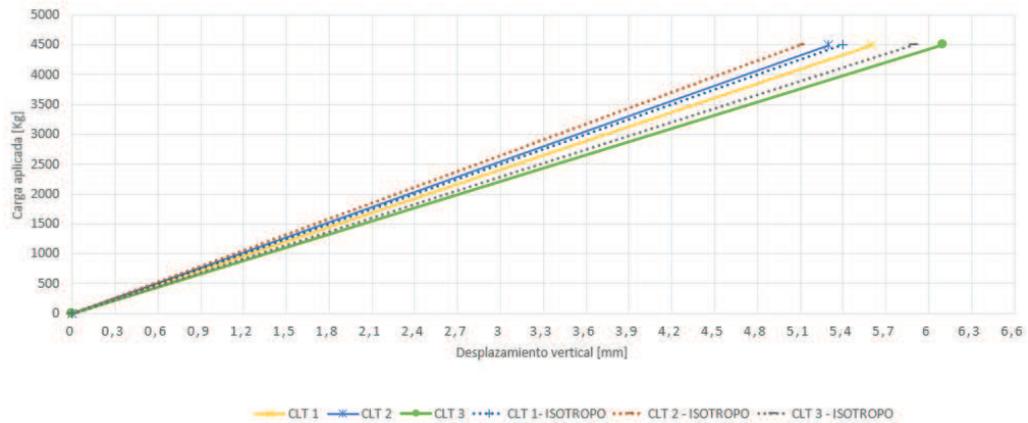


Fig. 95 - Comparativa en ensayo carga-deformación entre modelo virtual en madera contralaminada y modelo virtual con madera isótropa. Modelo EF placa.

Para el caso del ensayo a compresión, en el modelo de elementos finitos de placa, se observa un incremento en la flecha de un 37%, éste sí en modo notable respecto de su homólogo isótropo, el cual se incluye perfectamente entre el conjunto de resultados experimentales. En este caso se entiende que la respuesta a las acciones introducidas, al realizarse con todo el espesor de la sección, se obtienen reducciones mayormente significativas que en el modelo de flexión, donde las fibras cercanas al eje neutro carecen de sollicitación.

En cambio, el modelo de elementos finitos tridimensionales la desviación típica entre el modelo en madera contralaminada y el isótropo, no es tan importante, desviando un 7% por encima la madera contralaminada.

La figura siguiente muestra los resultados de este último ensayo realizado.

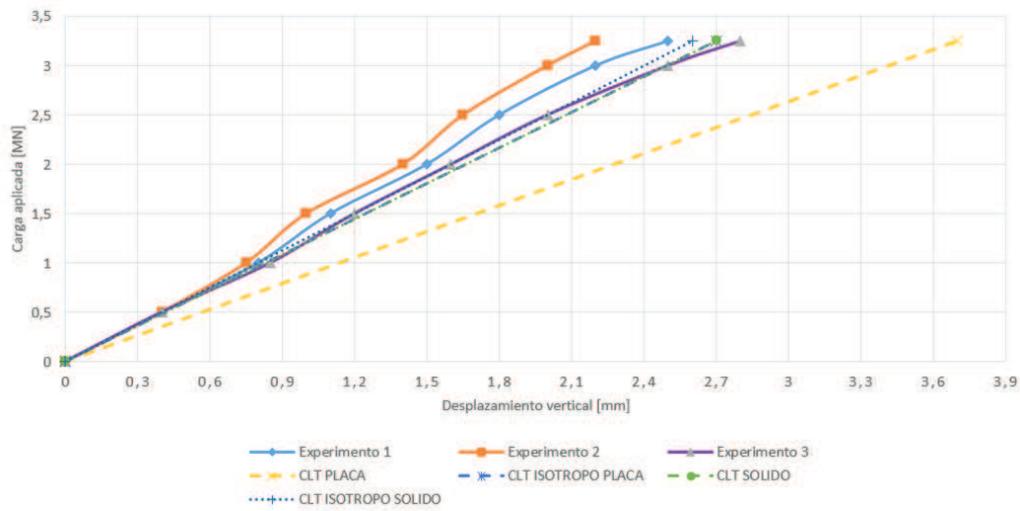


Fig. 96 - Comparativa en ensayo carga-deformación entre modelo experimental y modelo virtual en madera contralaminada. Modelo EF placa y sólidos.

Como conclusión se puede afirmar, que el comportamiento a flexión del modelo de EF de placa es mucho más efectivo que el tridimensional, mientras que en compresión, en modelo de EF tridimensionales resulta más cercano a la respuesta real de material.

La comparación con la respuesta isotrópica del material ha sido de gran ayuda para ofrecer una comparativa ulterior en la validación del modelo.





5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE ENERGÍA EMBEBIDA Y EMISIONES DE CO₂ EN ESTRUCTURAS CONVENCIONALES DE EDIFICACIÓN EN EUROPA. VENTAJAS EN EL USO DE LA MADERA CONTRALAMINADA.



5.1. Metodología empleada y muestras de vivienda utilizadas.



5.1. Selección de muestras de vivienda utilizadas y metodología empleada

El objetivo del presente apartado de la tesis consistirá en la cuantificación comparativa de la eficiencia estructural de la madera contralaminada frente a los dos sistemas estructurales convencionales mencionados, en términos de consumo energético y generación de emisiones de CO₂, únicamente de los capítulos de estructura y cerramientos (Monahan & Powell 2011).

Los periodos del ciclo de vida estudiados son la fase de construcción del edificio y la fase de utilización durante el periodo de vida útil.

Tipologías de vivienda e impacto ambiental de la construcción en la UE-25

Para poder establecer una mejor valoración de los aspectos energéticos respecto de la eficiencia estructural del sistema planteado, de gran utilidad nos sirve el estudio concreto de la tipología arquitectónica más abundante en el actual parque inmobiliario, que es la vivienda.

Según el proyecto de investigación europeo Potenciales de Mejora Medioambiental de los edificios Residenciales (IMPRO-Building) (Françoise Nemry et al., 2008), el 60% del consumo de energía primaria y entre el 70-80% de los impactos medioambientales corresponden a los productos de vivienda, transporte y comida y bebida.

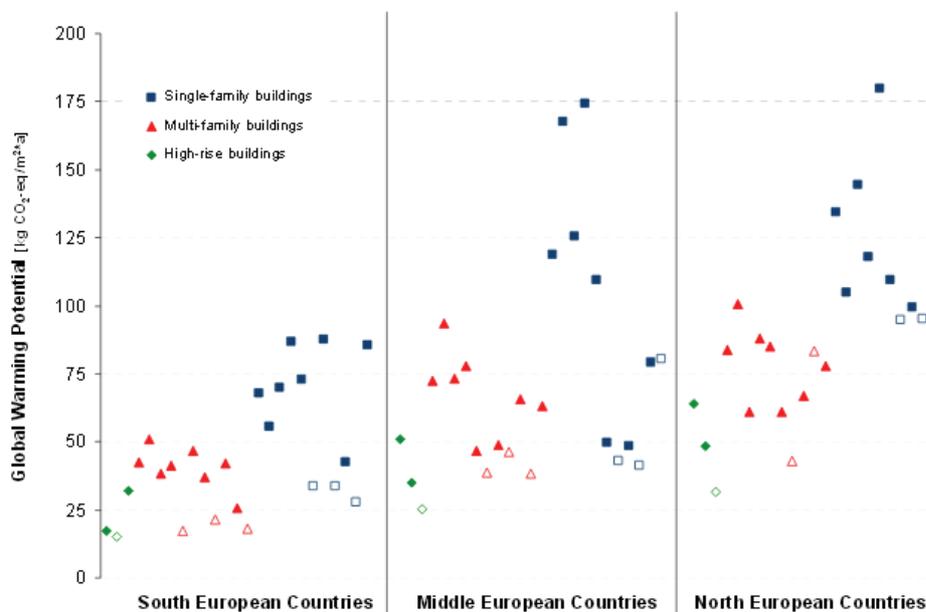


Fig. 97 - Potenciales de calentamiento global por áreas y tipologías. (Françoise Nemry et al., 2008)

Su objetivo principal es definir la tipología más apropiada mediante los modelos más representativos de la UE-25, para actualizar los impactos de ACV de dichos modelos e identificar las opciones de mejora.

La unidad funcional del ACV se consideró el uso de un metro cuadrado de superficie habitable por año y se presumió una vida útil del parque existente de 40 años, también para los edificios de nueva construcción (Françoise Nemry et al., 2008).

El diagnóstico resulta claro. El consumo de calefacción domina la fase de uso de los edificios.

Respecto de las medidas en edificios existentes se introdujeron un mayor aislamiento de la envolvente y un sellado para reducir la ventilación. Estas medidas implicarían una reducción del 20% de las emisiones (Françoise Nemry et al., 2008). En los edificios nuevos, a partir del 1991, se plantea un cambio en la elección de los materiales para reducir la energía embebida.

Se dividió el total de la UE-25 en tres zonas climáticas, según la radiación:

- Zona 1- Sur de Europa, incluida Francia, donde los impactos son menores.
- Zona 2 - Centro de Europa
- Zona 3 - Norte de Europa

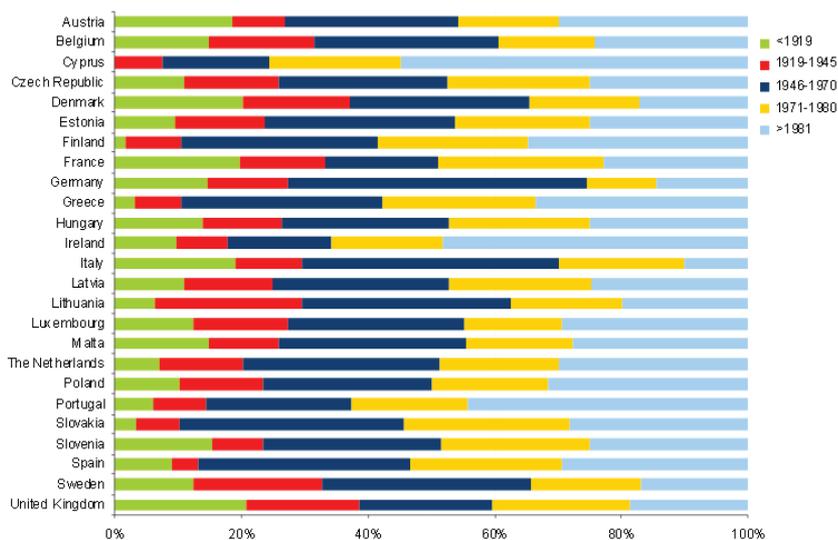


Fig. 98 - Distribución del parque inmobiliario por naciones UE-25. (Françoise Nemry et al., 2008)

La zona 2 es la mas importante por un mayor número de viviendas, sobretudo unifamiliar que es la tipología de mayor impacto ambiental. Los edificios en gran altura suponen muy poco porcentaje, en las tres zonas geográficas. En la siguiente figura aparecen los porcentajes de los diferentes tipos de vivienda, siendo las viviendas unifamiliares con el 53% las mas abundantes, seguidas con el 37% de viviendas en edificios plurifamiliares. Las primeras presentan una dispersión de resultados mayor que las segundas, siendo los edificios en altura quienes concentran mas los impactos de ACV en valores con una desviación típica mínima.

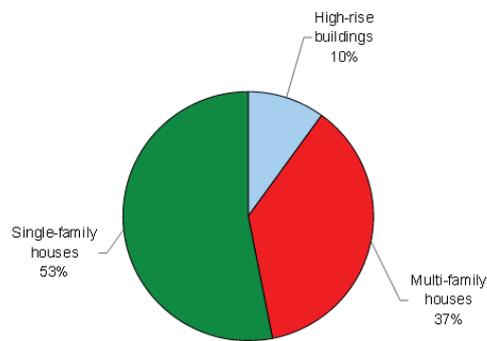


Fig. 99 - Distribución de las tipologías residenciales en la UE-25. (Françoise Nemry et al., 2008)

Por otro lado, se muestra en la siguiente figura el potencial de calentamiento global (PCG) de aquellas tipologías de vivienda que afectan mayormente bien por su valor absoluto bien por su elevado numero.

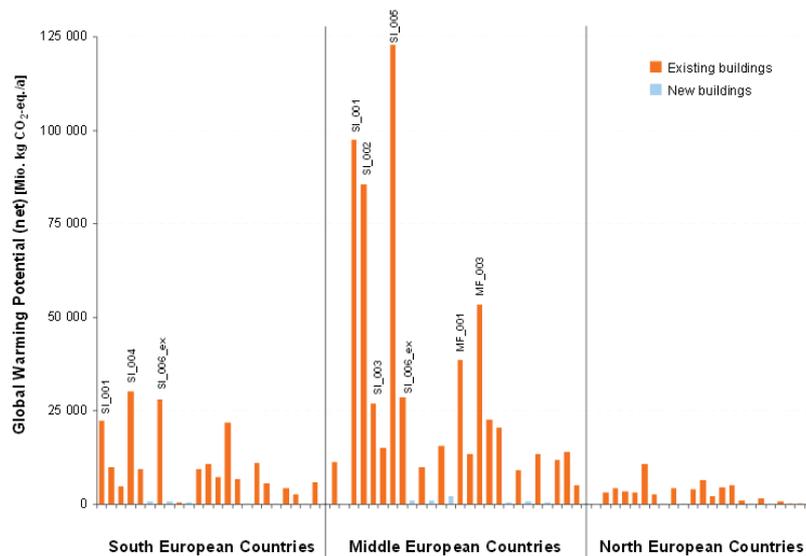


Fig. 100 - Potencial de calentamiento global según tipología de vivienda. (Françoise Nemry et al., 2008)

Metodología empleada

De las dos muestras que posteriormente describiremos en profundidad y sobre las que se desarrollará todo el plan experimental del presente apartado, se procede al cálculo de la estructura según los Eurocódigos, hasta cumplir estrictamente los requisitos establecidos en la normativa actual.

En el caso de la madera contralaminada, conjuntamente con las especificaciones del Eurocódigo 5, se ha utilizado el Documento de Idoneidad Técnica Europeo (DITE) de la empresa KLH massivholz GMBH, así como las secciones comerciales que dicha empresa utiliza en la fabricación de tableros de madera contralaminada.

Posteriormente se realiza el cálculo energético de la fase de extracción, fabricación, montaje y puesta en obra de los materiales que componen estructura y cerramientos del edificio, mediante la medición de las masas de los elementos integrantes de los dos sistemas. A cada masa se le asignarán unos valores de energía embebida y emisiones de CO₂ equivalentes en función del material empleado.

Dado que la madera contralaminada compone tanto la estructura como el cerramiento del edificio, en la valoración energética de los dos sistemas convencionales comparados, hormigón armado y acero estructural, se han asignado para los dos últimos unos parámetros de cerramiento convencional con muro doble y aislamiento interno, con idéntico espesor y material aislante interno, para establecer una comparación creíble.

En el apartado de evaluación energética en el periodo de utilización, también se ha tenido en cuenta los parámetros arriba mencionados. Para realizar dicho cálculo se han evaluado las dos muestras utilizadas mediante el programa informático CERMA (Certificación de Eficiencia Energética de Edificios de viviendas nuevos y existentes. Método Abreviado) (CERMA, 2013), documento reconocido por el Ministerio de Fomento para calificación energética de edificios de vivienda.

Hipótesis de cálculo

Programa de necesidades

Los dos edificios objeto de cálculo tienen uso residencial vivienda en toda su superficie, salvo el edificio plurifamiliar, que tiene un local sin uso específico en planta baja. La construcción seguirá el proceso habitual donde la colocación del pavimento es posterior a la de la tabiquería. Los pavimentos a utilizar en todas las hipótesis de cálculo

lo vendrán colocados con junta abierta de cara al historial de carga de la estructura.

Bases de cálculo

-Periodo de vida de 50 años en todos los casos

-Consideraciones

a) Tipo estructural

- i) Madera contralaminada – Muros y losas de madera contralaminada de espesores diferentes según la sollicitación.
- ii) Hormigón armado – Soportes y forjados de hormigón armado HA-25/20/B/IIa.
- iii) Acero – Pilares y vigas de perfiles laminados S-275JR. Forjados de chapa grecada con capa de compresión de hormigón armado.

b) Características de las secciones y tipo de conexiones

- i) Madera contralaminada – Secciones de madera contralaminada espesores desde 72mm hasta 145mm. Conexionado mediante herrajes en acero.
- ii) Hormigón armado–Secciones de hormigón armado HA-25/20/B/IIa armado con acero B-400S. Conexionado de elementos y barras de armado.
- iii) Acero – Secciones perfiles laminados S-275JR. Chapa grecada Incoperfil 70.4 de 1mm espesor con 4cm de compresión de hormigón. Uniones atornilladas en todos los nudos.

-Características mecánicas de los materiales estructurales

- a) Madera contralaminada. Según la caracterización del material establecida en la DITE, el fabricante garantiza los valores reflejados en el mismo.
- b) Hormigón armado. Según el Eurocódigo 2 se establece la resistencia de cálculo de 16,67 MPa a compresión.
- c) Acero estructural. Según el Eurocódigo, la resistencia de cálculo de los elementos de acero para los espesores considerados es de 261,90 MPa.

Análisis estructural

Para la realización del análisis estructural se ha modelizado bien sea la geometría de la estructura, como las acciones y las condiciones de apoyo mediante el modelo generado y convenientemente validado en el apartado anterior de la presente tesis,

capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento estructural. Se ha realizado la modelización mediante el programa informático ANGLE (Alonso, 2015), cuyo método de cálculo incorpora las investigaciones validadas anteriormente.

El análisis estructural será del tipo lineal, dado que en los tres casos, el material empleado posee la característica de linealidad de deformaciones frente a acciones, dentro del límite elástico. El análisis lineal elástico se considera, en principio, adecuado para obtener esfuerzos tanto en Estados Límite de Servicio como en Estados Límite Últimos en todo tipo de estructuras, cuando los efectos de segundo orden sean despreciables.

Cálculo de solicitaciones. Hipótesis de combinación.

Las siguientes tablas reflejan las hipótesis de combinación utilizadas.

Tabla de combinación de estados límites últimos

Numero	Tipo	Peso Propio	Uso	Nieve
ELU-01	Persistente 1	1,35	1,50	0,75
ELU-02	Persistente 2	1,35	1,05	1,50

Tabla 23 - Tabla de combinación de estados límites últimos

Tabla de combinación de estados límites de servicio

Numero	Tipo	Peso Propio	Uso	Nieve
ELS-01	Característica 1	1,00	1,00	0,50
ELS-02	Característica 2	1,00	0,70	1,00
ELS-03	Frecuente 1	1,00	0,50	0,00
ELS-04	Frecuente 2	1,00	0,30	0,20
ELS-05	Casi Permanente	1,00	0,30	0,00

Tabla 24 - Tabla de combinación de estados límites de servicio

5.1.1. Modelo de vivienda unifamiliar aislada

El primer modelo de vivienda es una vivienda unifamiliar aislada, en parcela propia. De planta rectangular y desarrollada en dos plantas, baja mas primera, alberga un programa con salón-comedor, cocina, tres baños y tres habitaciones en planta primera. La ubicación exacta es 39°31'23.51"N y 0°29'35.94"O. Las siguientes figuras muestran la geometría y el entorno de la misma. Se trata de una vivienda construida.



Fig. 101 - Ubicación muestra vivienda unifamiliar aislada. (Google Earth, 2015)

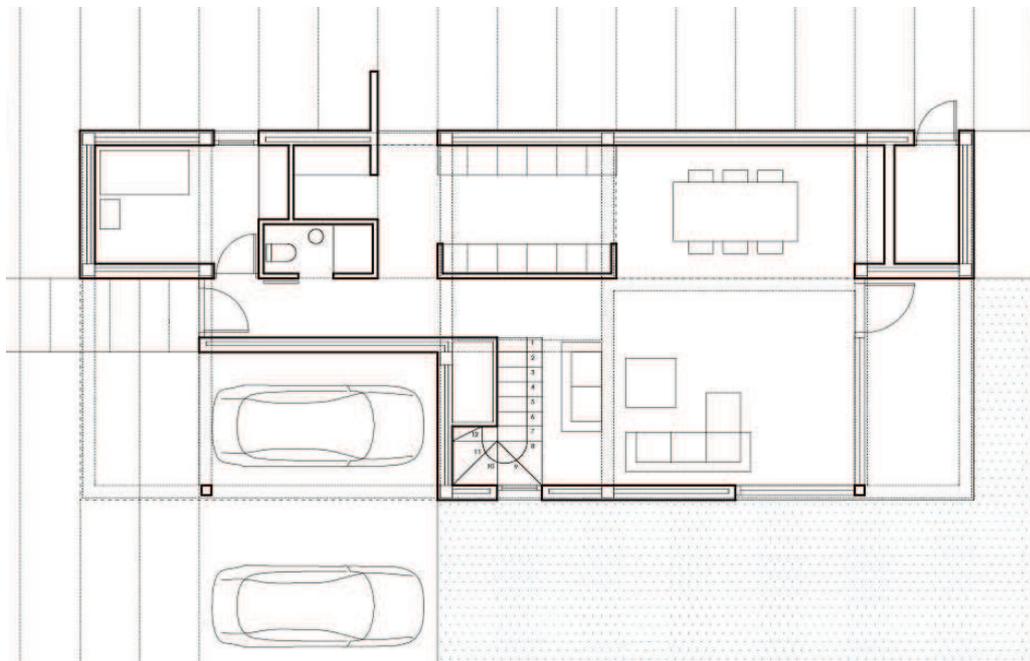


Fig. 102 - Planta baja de vivienda unifamiliar aislada.

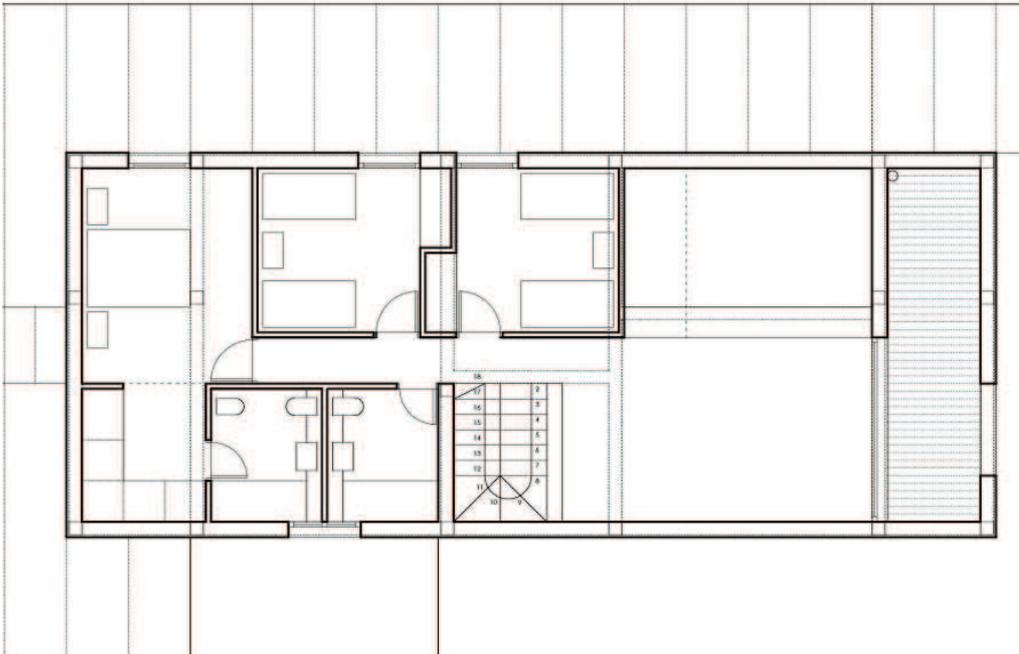


Fig. 103 - Planta primera de vivienda unifamiliar aislada.

Modelo en madera contralaminada

Para la modelización de la estructura en madera contralaminada, los elementos en su gran mayoría bidimensionales, se han modelizado por laminas, teniendo en cuenta el desarrollo de la investigación precedente para visualizar el comportamiento de las losas actuando bien sea como forjado que como muro.

Por cuestiones de construcción, debido a la interrupción del apoyo del panel de muro, se ha limitado la flexión de placa a un 20% en los elementos finitos mas cercanos a la unión del forjado, mientras que la tension de membrana se ha mantenido en el 100%.

Para salvar los apoyos de las losas horizontales, se han incorporado vigas en madera contralaminada aprovechando la misma sección que las losas de forjado. Asi pues, los elementos tipo barra han sido modelizados espacialmente, como ejes que pasan por el centro de gravedad de la sección.

El modelo de cálculo consta de 2882 láminas, 12 barras y 3231 nodos, representados en las figuras siguientes.

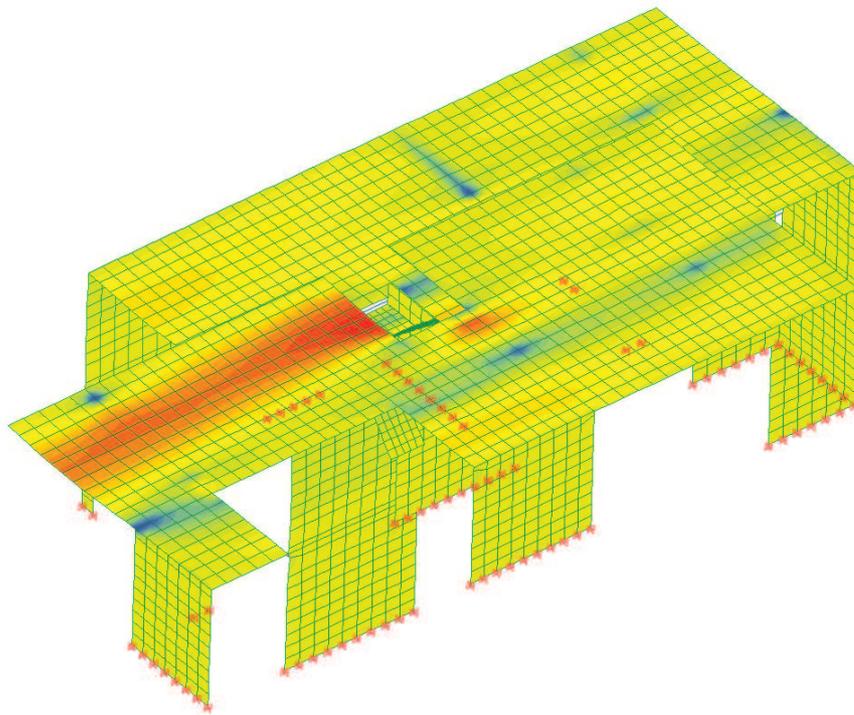


Fig. 104 - Estado de deformaciones en madera contralaminada para vivienda unifamiliar aislada.
Momento flector en eje Y.

Modelo en hormigón armado

Para la modelización de la estructura en hormigón armado, los elementos tipo barra han sido modelizados espacialmente, como ejes que pasan por el centro de gravedad de la sección.

Con vigas de sección rectangular de 25x60cm para una luz de 7m y 25x40cm para 5m y pilares de hormigón armado de 25x25cm.

La modelización de la losa de hormigón armado de la escalera se efectúa con elementos finitos superficiales, definidos tridimensionalmente con comportamiento de membrana en su plano y flexión en dirección perpendicular al plano medio.

El modelo de cálculo consta de 391 láminas, 100 barras y 264 nodos, representados en la figura siguiente.

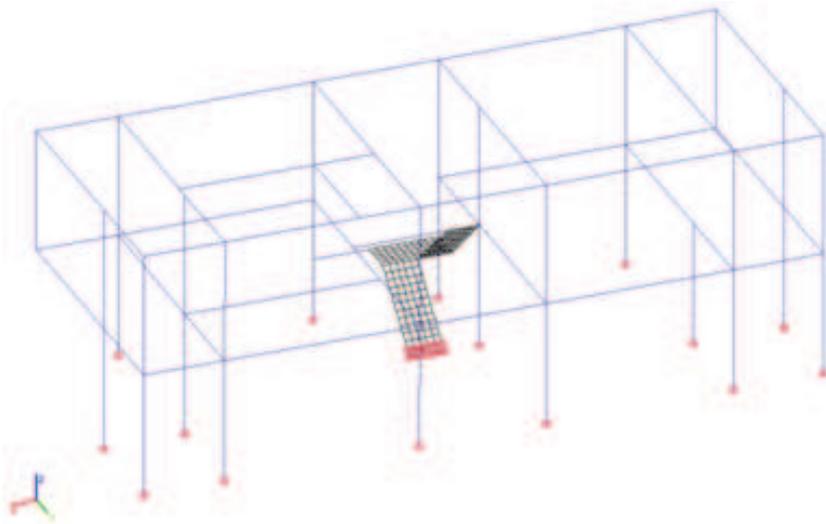


Fig. 105 - Modelo estructural en hormigón armado para vivienda unifamiliar aislada.

Modelo en acero estructural

Para la modelización de la estructura en acero estructural, los elementos tipo barra han sido modelizados espacialmente, como ejes que pasan por el centro de gravedad de la sección.

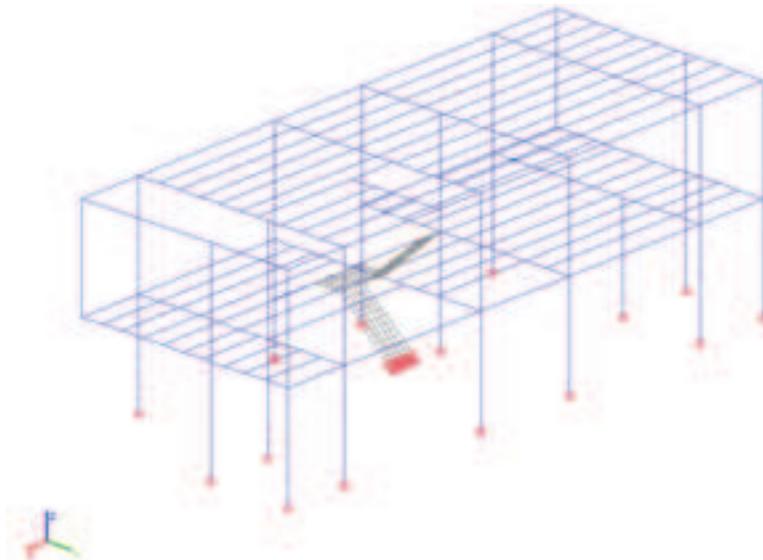


Fig. 106 - Modelo estructural de barras en acero estructural para vivienda unifamiliar aislada.

Con vigas IPE-300 para luces de 7 m, IPE-270 en 4,5m y IPE-240 para luces de 3m, los pilares son HEB-180.

El modelo de cálculo consta de 170 láminas, 267 barras y 360 nodos, representados en la figura anterior.

5.1.2. Modelo de bloque de viviendas entre medianeras

La segunda muestra es un edificio de viviendas entre medianeras, conoformando una manzana cerrada.

De planta trapezoidal se desarrolla en planta baja, donde existe un local sin uso específico, y cinco plantas altas. Todas ellas incluyen dos viviendas por planta, siendo la última la que se retranquea de la fachada para constituir un ático. Cada vivienda dispone una distribución interior. La ubicación exacta es $39^{\circ}27'29.57''N$ y $0^{\circ}20'6.83''O$.

La siguientes figuras muestran la geometría y el entorno del edificio. Se trata de un edificio construido.

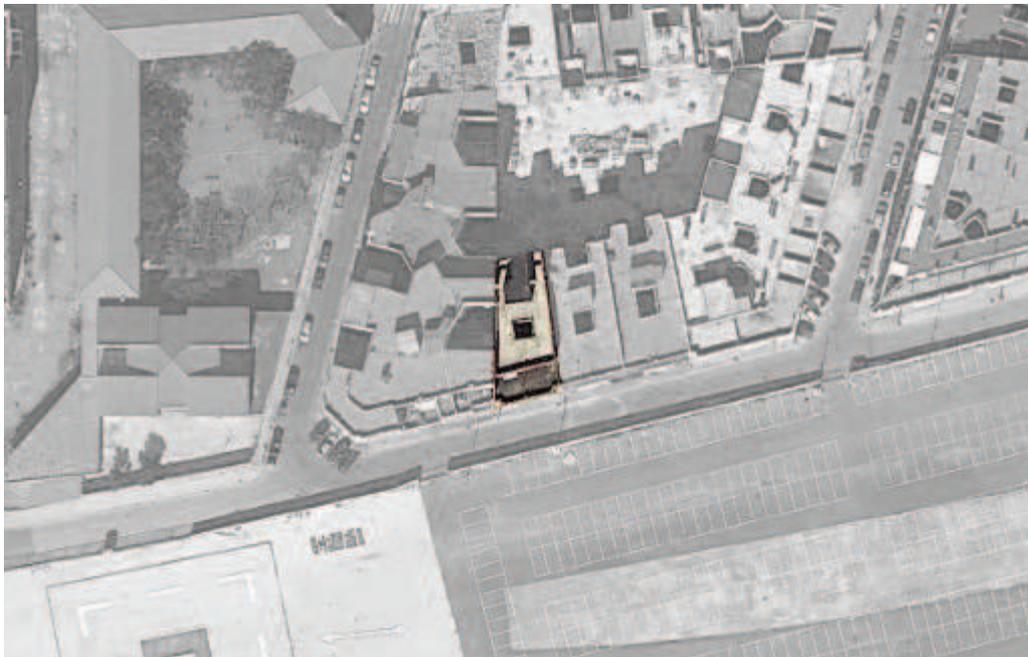


Fig. 107 - Ubicación muestra bloque de viviendas entre medianeras. (Google Earth, 2015)

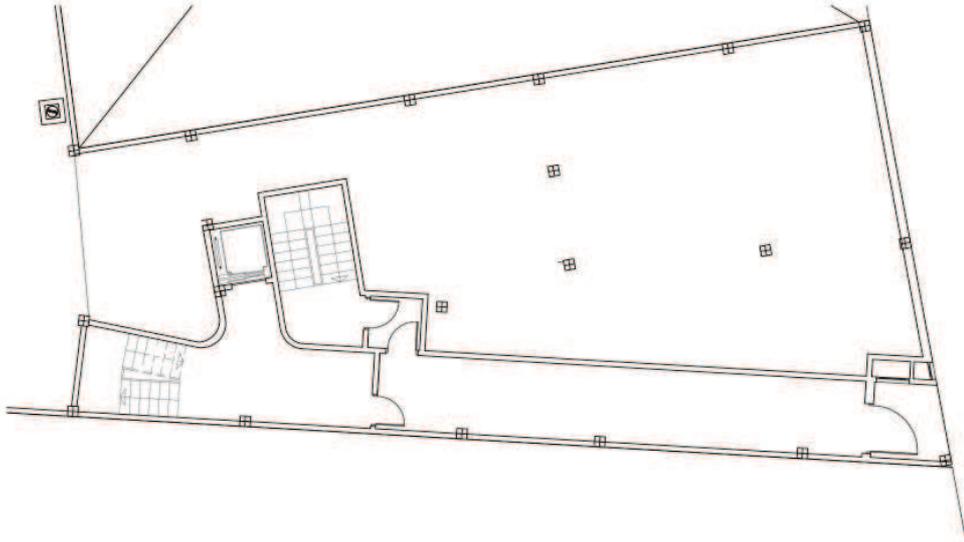


Fig. 108 - Planta baja muestra bloque de viviendas entre medianeras.

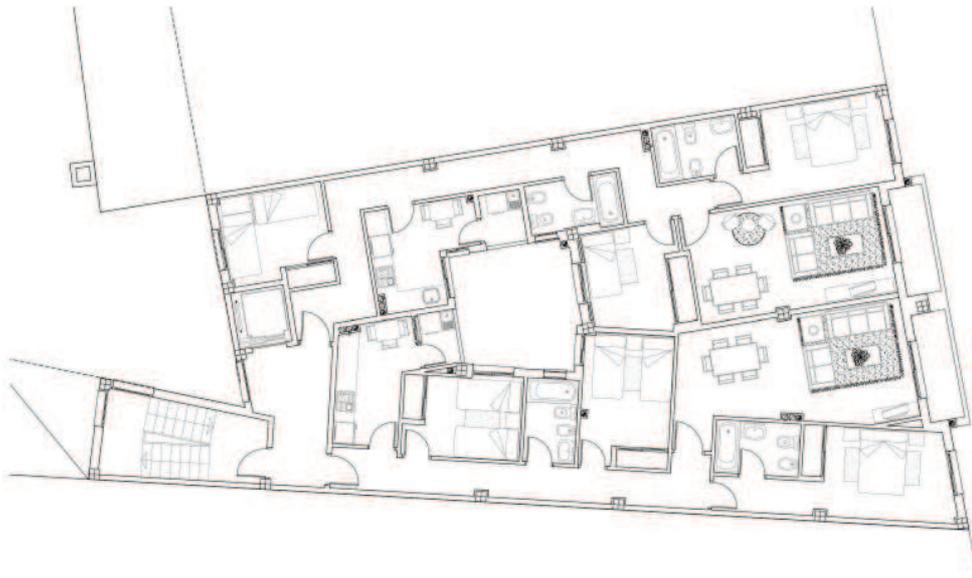


Fig. 109 - Planta tipo muestra bloque de viviendas entre medianeras.

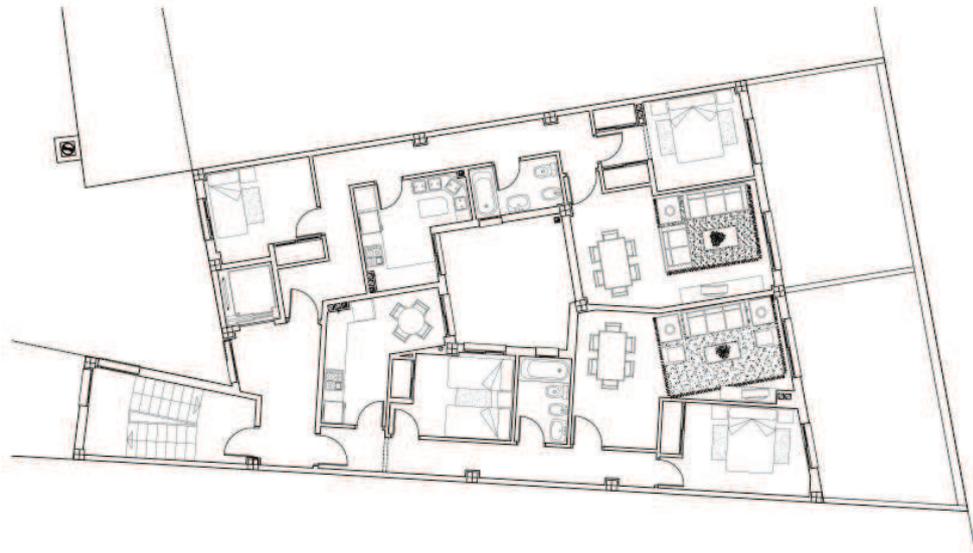


Fig. 110 - Planta atico muestra bloque de viviendas entre medianeras.

Modelo en madera contralaminada

Para la modelización de la estructura en madera contralaminada, los elementos en su gran mayoría bidimensionales, se han modelizado por laminas, teniendo en cuenta el desarrollo de la investigación precedente para visualizar el comportamiento de las losas actuando bien sea como forjado que como muro.

Por cuestiones de construcción, debido a la interrupción del apoyo del panel de muro, se ha limitado la flexión de placa a un 20% en los elementos finitos mas cercanos a la unión del forjado, mientras que la tensión de membrana se ha mantenido en el 100%.

Para salvar los apoyos de las losas horizontales, se han incorporado vigas en madera contralaminada aprovechando la misma sección que las losas de forjado. Así pues, los elementos tipo barra han sido modelizados espacialmente, como ejes que pasan por el centro de gravedad de la sección.

El modelo de cálculo consta de 39097 láminas, 23 barras y 25525 nodos, representados en la figura siguiente.

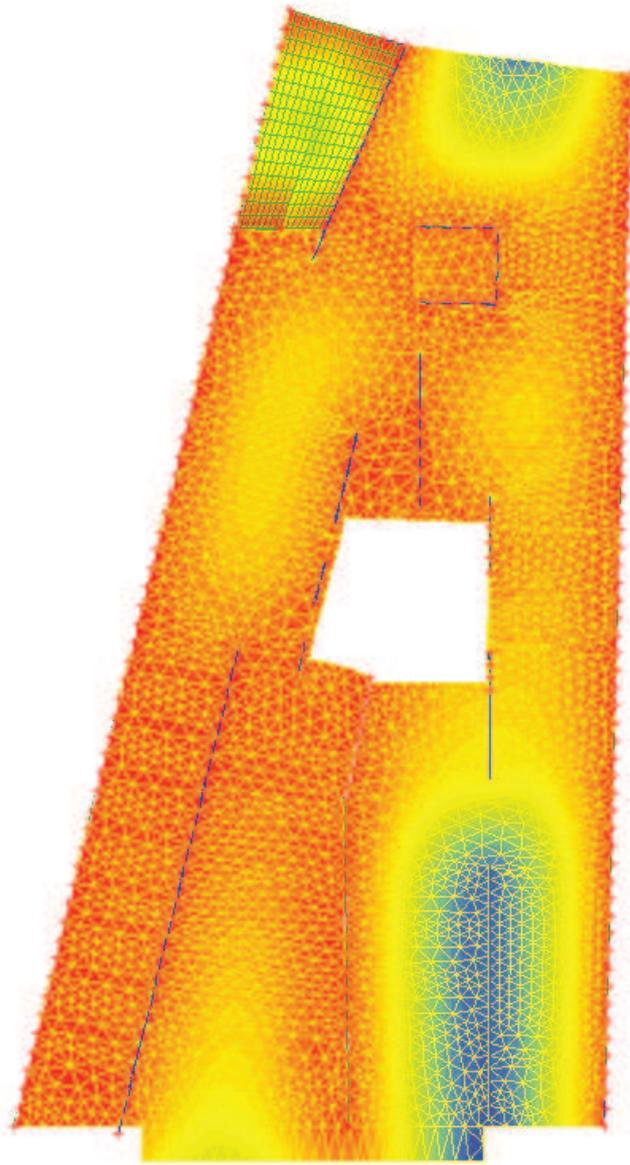


Fig. 111 - Estado de deformaciones en madera contralaminada para bloque de viviendas entre medianeras.

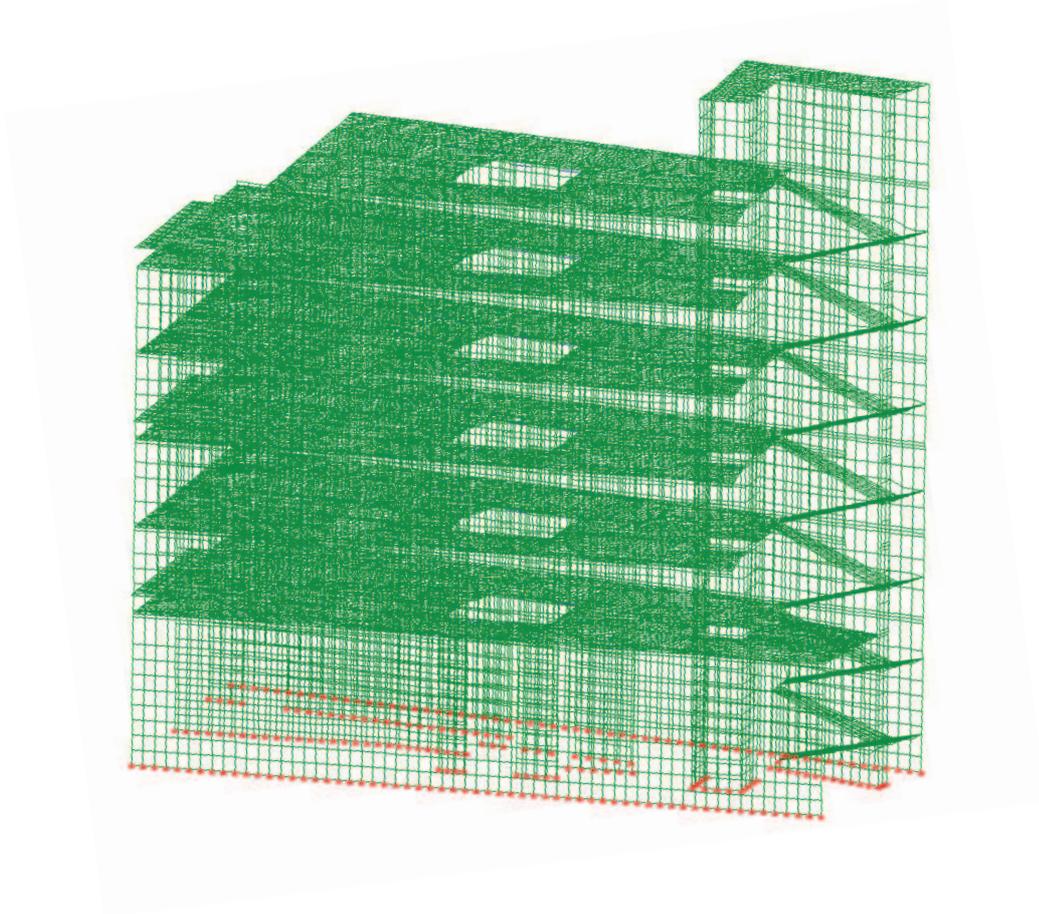


Fig. 112 - Modelo estructural en madera contralaminada para bloque de viviendas entre medianeras.

Modelo en hormigón armado

Los elementos tipo barra han sido modelizados espacialmente, como ejes que pasan por el centro de gravedad de la sección. Con vigas de sección rectangular de 60x30cm para una luz de 6,5m y 50x30cm para 5m y pilares interiores de 35x35cm y pilares perimetrales de 30x30cm.

La modelización de la losa de hormigón armado de la escalera se efectúa con elementos finitos superficiales, definidos tridimensionalmente con comportamiento de membrana en su plano y flexión en dirección perpendicular al plano medio.

El modelo de cálculo consta de 22 láminas, 460 barras y 256 nodos, representados en la figura adjunta.

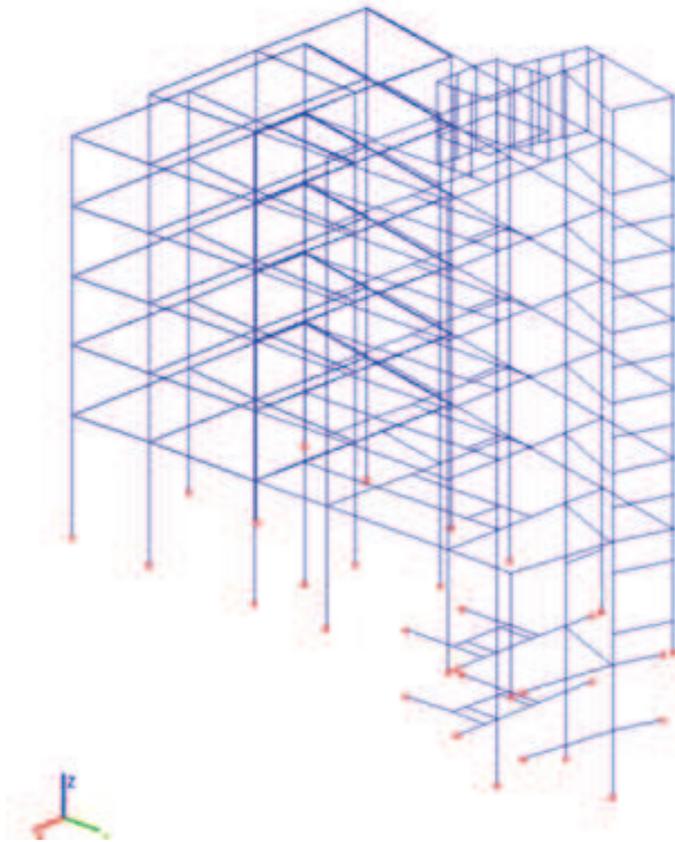


Fig. 113 - Modelo estructural en hormigón armado para bloque de viviendas entre medianeras.

Modelo en acero estructural

Los elementos tipo barra han sido modelizados espacialmente, como ejes que pasan por el centro de gravedad de la sección. Con vigas IPE-300 para luces de 6 m, IPE-240 en 4m y IPE-240 para, pilares interiores HEB-220 y exteriores HEB-200.

El modelo de cálculo consta de 46 láminas, 938 barras y 551 nodos, representados en la figura adjunta.

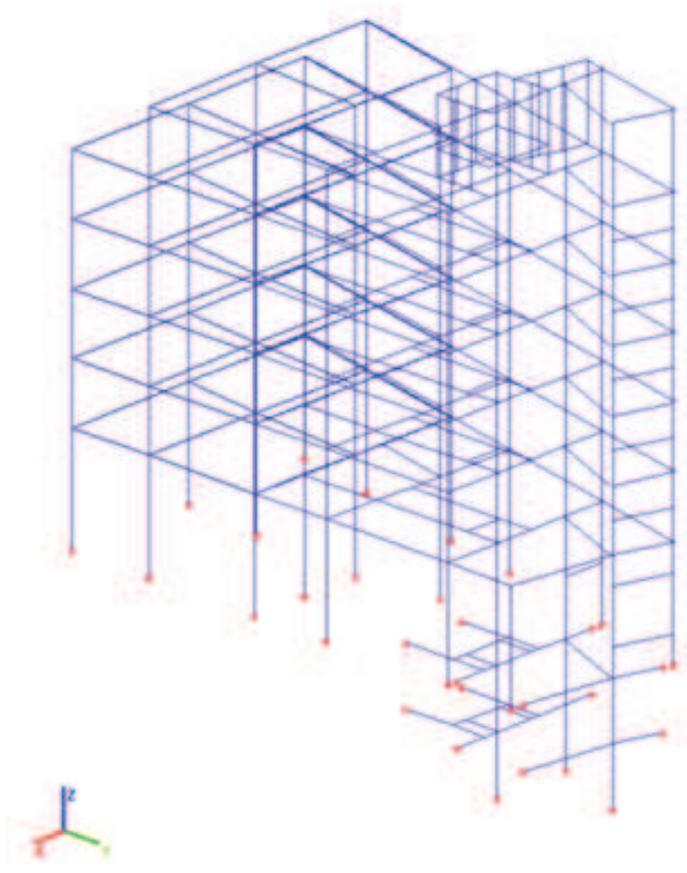


Fig. 114 - Modelo estructural en acero estructural para bloque de viviendas entre medianeras.



5.2. Coste energético y en emisiones CO₂ de la fase de construcción



De conformidad con lo expuesto en el apartado anterior, se procede al sumatorio de las masas intervinientes en la construcción de las estructuras calculadas y peritadas para cumplir la normativa actual en materia de edificación en la UE. Una vez calculadas las muestras en los diferentes sistemas estructurales propuestos, se obtienen las mediciones de cada uno de los elementos que componen el sistema.

Para hacer un balance energético del periodo de construcción, una vez obtenidas las mediciones, se calcula la equivalencia en masa de cada material por separado según su densidad. En el caso de los cerramientos se procede de modo idéntico, mediante el cálculo de las masas de cada uno de los materiales intervinientes en la construcción.

Asimismo se han contabilizado los elementos constructivos necesarios para generar la envolvente del edificio y componer los cerramientos de cada uno de los modelos. En el caso de la madera contralaminada, como el propio panel constituye la hoja principal del cerramiento, no hace falta la incorporación de mas elementos que el revestimiento final y el aislamiento.

En cambio, para el caso de los otros dos sistemas estructurales, el muro de cerramiento del modelo está compuesto por un muro de dos hojas con cámara interior con aislamiento, todo ello con el sistema convencional compuesto por ladrillo hueco cerámico.

Para el cálculo de la energía embebida en los elementos se ha utilizado la base de datos del banco de datos BEDEC (ITEC, 2015) del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña, calculando la energía en MJ / Kg de cada elemento constructivo. Se han diferenciado los elementos componentes del sistema, agrupándolos en algunas ocasiones, mientras que en otras se han diferenciado, bien por su importancia en masa, bien por su impacto en huella ecológica.

Las siguientes tablas muestran la comparativa de los tres sistemas estructurales objeto de estudio, bien sea como masa aplicada al terreno, bien como energía embebida en la fase de extracción, producción y puesta en obra de cada elemento, para cada una de las dos muestras empleadas, es decir, vivienda unifamiliar y edificio de viviendas entre medianeras.

Tabla de energía primaria construcción de estructura y cerramientos con madera contralaminada

Material	medición	espesor	densidad	masa	contenido en. primaria	ENERGIA PRIMARIA
	m3-m2	m	kg/m3	kg	MJ/kg - MJ/m2	MJ
Tablero madera contralaminada	41,8		465	19.437	4,00	77.748
Acero en herrajes montaje				475	37,45	17.789
					estructura	95.537
Cerramiento fachada sin panel	226,50					
Pintura plastica interior	226,50	0,001	1035	234	100,33	23.520
Placa yeso laminado	226,50	0,015	900	3.058	23,98	73.325
Aislante XPS 6cm	226,50	0,06	33	448	193,97	86.990
Mortero exterior	226,50	0,015	2000	6.795	3,02	20.521
Cubierta plana sin panel	120,00					
Aislante XPS 6cm	120,00	0,06	33	238	100,33	23.838
Cubierta transit. Ac. Ceramico	120,00	0,15	550	9.900	640,35	76.842
					cerramientos	305.036
			Total masa	40.585	E. primaria	400.573

Tabla 25 - Energia primaria construcción con madera contralaminada - vivienda unifamiliar

Tabla de energía primaria construcción de estructura y cerramientos -
hormigón armado con cerramiento convencional

material	medición	espesor	densidad	masa	contenido en. primaria	ENERGIA PRIMARIA
	m3-m2	m	kg/m3	kg	MJ/kg	MJ
Hormigón armado en pilares	5,62		2409	13.539	1,08	14.622
Hormigón armado en vigas	12,6		2409	30.353	0,69	20.944
Hormigón armado en forjado	11,46		2409	27.607	0,28	7.730
Acero en barra				3.375	37,45	126.394
					estructura	169.689
Cerramiento fachada	226,50					
Pintura plastica interior	226,50	0,001	1035	234	100,33	23.520
Placa yeso laminado	226,50	0,015	900	3.058	23,98	73.325
Fábrica ladrillo hueco triple	226,50	0,115	1217	31.700	1,83	58.011
Fábrica ladrillo hueco doble	226,50	0,07	1242	19.692	1,83	36.036
Aislante XPS 6cm	226,50	0,06	33	448	193,97	86.990
Mortero exterior	226,50	0,015	2000	6.795	3,02	20.521
Cubierta plana	120,00					
Aislante XPS 6cm	120,00	0,06	33	238	100,33	23.838
Cubierta transit. Ac. Ceramico	120,00	0,15	550	9.900	640,35	76.842
					cerramientos	399.083
			Total masa	146.939	E. primaria	568.772

Tabla 26 - Energía primaria construcción con hormigón armado - vivienda unifamiliar

Tabla de energía primaria construcción de estructura y cerramientos -
acero estructural con cerramiento convencional

material	medi- ción	espesor	densidad	masa	contenido en. primaria	ENERGIA PRIMARIA
	m3-m2	m	kg/m3	kg	MJ/kg	MJ
Pilares acero estruc- tural				2.762	43,59	120.396
Vigas y viguetas acero estructural				12.963	44,5	576.854
Forjado chapa gre- cada	207					
Chapa acero + co- nectores	207	0,001	7861	1.627	42,8	69.645
Hormigón espesor 4cm	207	0,04	2500	20.700	0,28	5.796
					estructura	772.690
Cerramiento fachada	226,50					
Pintura plastica interior	226,50	0,001	1035	234	100,33	23.443
Placa yeso laminado	226,50	0,015	900	3.058	23,98	73.325
Fábrica ladrillo hueco triple	226,50	0,115	1217	31.700	1,83	58.011
Fábrica ladrillo hueco doble	226,50	0,07	1242	19.692	1,83	36.036
Aislante XPS 6cm	226,50	0,06	33	448	193,97	86.990
Mortero exterior	226,50	0,015	2000	6.795	3,02	20.521
Cubierta plana	120,00					
Aislante XPS 6cm	120,00	0,06	33	238	100,33	23.838
Cubierta transit. Ac. Cerámico	120,00	0,15	550	9.900	640,35	76.842
					cerramientos	399.083
			Total masa	110.117	E. primaria	1.171.773

Tabla 27 - Energía primaria construcción con acero estructural - vivienda unifamiliar

Tabla de energía primaria construcción de estructura y cerramientos
con madera contralaminada

material	medición	espesor	densidad	masa	contenido en. primaria	ENERGIA PRIMARIA
	m3-m2	m	kg/m3	kg	MJ/kg - MJ/ m2	MJ
Tablero madera contralaminada	342,77		465	159.388	4,00	637.552
Acero en herrajes montaje				475	37,45	17.789
					estructura	655.341
Cerramiento fachada sin panel	505,40					
Pintura plastica interior	505,40	0,001	1035	523	100,33	52.482
Placa yeso laminado	505,40	0,015	900	6.823	23,98	163.613
Aislante XPS 6cm	505,40	0,06	33	1.001	193,97	194.104
Mortero exterior	505,40	0,015	2000	15.162	3,02	45.789
Cerramiento media- nera	881,00					
Pintura plastica interior	881,00	0,001	1035	912	100,33	91.484
Placa yeso laminado	881,00	0,013	900	10.308	23,98	247.179
Aislante XPS 2cm	881,00	0,02	33	581	193,97	112.786
Cubierta plana sin panel	231,80					
Aislante XPS 6cm	231,80	0,06	33	459	100,33	46.048
Cubierta transit. Ac. Ceramico	231,80	0,15	550	19.124	640,35	148.433
					cerramientos	1.101.918
			Total masa	214.755	E. primaria	1.757.259

Tabla 28 - Energía primaria construcción con madera contralaminada - edificio de viviendas

Tabla de energía primaria construcción de estructura y cerramientos -
hormigón armado con cerramiento convencional

material	medi- ción	espesor	densidad	masa	contenido en. primaria	ENERGIA PRIMARIA
	m3-m2	m	kg/m3	kg	MJ/kg - MJ/ m2	MJ
Hormigón armado en pilares	26,15		2409	62.995	1,08	68.035
Hormigón armado en vigas	55,90		2409	134.663	0,69	92.918
Hormigón armado en forjado	51,87		2409	124.955	0,28	34.987
Acero en barra				15.221	37,45	570.026
					estructura	765.966
Cerramiento fachada	505,40					
Pintura plastica interior	505,40	0,001	1035	523	100,33	52.482
Placa yeso laminado	505,40	0,015	900	6.823	23,98	163.613
Fábrica ladrillo hueco triple	505,40	0,115	1217	70.733	1,83	129.442
Fábrica ladrillo hueco doble	505,40	0,07	1242	43.939	1,83	80.409
Aislante XPS 6cm	505,40	0,06	33	1.001	193,97	194.104
Mortero exterior	505,40	0,015	2000	15.162	3,02	45.789
Cerramiento media- nera	881,00					
Pintura plastica interior	881,00	0,001	1035	912	100,33	91.484
Placa yeso laminado	881,00	0,013	900	10.308	23,98	247.179
Aislante XPS 2cm	881,00	0,02	33	581	193,97	112.786
Fábrica ladrillo hueco triple	881,00	0,115	1217	123.300	1,83	225.640
Cubierta plana	231,80					
Aislante XPS 6cm	231,80	0,06	33	459	100,33	46.048
Cubierta transit. Ac. Cerámico	231,80	0,15	550	19.124	640,35	148.433
					cerramientos	1.537.409
			Total masa	630.700	E. primaria	2.303.375

Tabla 29 - Energía primaria construcción con hormigón armado - edificio de viviendas

Tabla de energía primaria construcción de estructura y cerramientos -
acero estructural con cerramiento convencional

material	medi- ción	espesor	densidad	masa	contenido en. primaria	ENERGIA PRIMARIA
	m3-m2	m	kg/m3	kg	MJ/kg - MJ/ m2	MJ
Pilares acero estructural				17.423	43,59	759.469
Vigas y viguetas acero estructural				69.692	44,5	3.101.294
Forjado chapa grecada	1117					
Chapa acero + conectores	1117	0,001	7861	8.781	42,8	375.816
Hormigón espesor 4cm	1117	0,04	2500	111.700	0,28	31.276
					estructura	4.267.854
Cerramiento fachada	505,40					
Pintura plastica interior	505,40	0,001	1035	523	100,33	52.482
Placa yeso laminado	505,40	0,015	900	6.823	23,98	163.613
Fábrica ladrillo hueco triple	505,40	0,115	1217	70.733	1,83	129.442
Fábrica ladrillo hueco doble	505,40	0,07	1242	43.939	1,83	80.409
Aislante XPS 6cm	505,40	0,06	33	1.001	193,97	194.104
Mortero exterior	505,40	0,015	2000	15.162	3,02	45.789
Cerramiento medianera	881,00					
Pintura plastica interior	881,00	0,001	1035	912	100,33	91.484
Placa yeso laminado	881,00	0,013	900	10.308	23,98	247.179
Aislante XPS 2cm	881,00	0,02	33	581	193,97	112.786
Fábrica ladrillo hueco triple	881,00	0,115	1217	123.300	1,83	225.640
Cubierta plana	231,80					
Aislante XPS 6cm	231,80	0,06	33	459	100,33	46.048
Cubierta transit. Ac. Cerámico	231,80	0,15	550	19.124	640,35	148.433
					cerramientos	1.537.409
			Total masa	500.461	E. primaria	5.805.263

Tabla 30 - Energía primaria construcción con acero estructural - edificio de viviendas



**5.3. Eficiencia energética y en emisiones CO₂
en la fase de utilización del edificio.**



Visualizada la demanda de energía primaria para la construcción de los dos edificios utilizados como muestra, el segundo período de valoración incluye la energía primaria consumida en el período de vida útil de la vivienda para, de este modo, tener la respuesta energética de dos etapas del ACV, que son aquellas más representativas.

La figura siguiente muestra el porcentaje que cada una de ellas representa en la edificación, según la tipología edificatoria. Las siglas SI responden a la tipología unifamiliar, mientras que las MF responden a la plurifamiliar.

Los edificios en altura quedan fuera del alcance del presente estudio por su bajo impacto en el global.

Zona	Grupo	Fase del Ciclo de Vida	EP (total)	PCG (neto)	PA	PE	PCOF	PACO
1	SI	Fase de Construcción	33,4 - 37,2	33,4 - 37,2	32,6 - 35,9	46,3 - 49,9	13,0 - 15,0	21,5 - 24,4
		Fase de Uso	62,8 - 66,6	62,8 - 66,6	64,1 - 67,4	50,1 - 53,7	85,0 - 87,0	75,6 - 78,5
		Fin de Vida Útil	1,5 - 3,2	1,5 - 3,2	0,8 - 1,1	1,5 - 1,7	0,3 - 0,4	-0,8 - -0,1
	MF	Fase de Construcción	26,4 - 34,7	26,4 - 34,7	26 - 35,4	39,3 - 47,7	9,2 - 13,6	15,1 - 20,6
		Fase de Uso	65,3 - 73,6	65,3 - 73,6	64,6 - 74	52,3 - 60,7	86,4 - 90,8	79,4 - 84,9
		Fin de Vida Útil	1,9 - 2,9	1,9 - 2,9	0,5 - 0,8	1,1 - 1,3	0,1 - 0,2	-0,8 - -0,3
	HR	Fase de Construcción	26,8	26,8	25,8	38,8	9,1	15,4
		Fase de Uso	73,2	73,2	74,2	61,2	90,9	84,6
		Fin de Vida Útil	1,7	1,7	0,8	1,3	0,2	-0,1

Fig. 115 - Tabla de categorías de impacto por tipología de vivienda en la zona 1.

(Françoise Nemry et al., 2008)

También otras investigaciones al respecto plantean un ahorro inmediato en emisiones y energía consumida de la madera respecto del acero y hormigón armado (Guerrilla et al., 2007).

El procedimiento elegido para obtener la calificación de eficiencia energética ha sido la Opción general mediante el programa CERMA (CERMA, 2013) con nº de inscripción CEE-DR-005/11 en el ministerio de fomento.

CERMA es un Documento Reconocido para la certificación de eficiencia energética, según lo dispuesto en el artículo 3 del Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.

Se han analizado los tres sistemas estructurales por separado sobre las muestras objeto de análisis. Como consideraciones de partida para homogeneizar los resultados y permitir su comparación:

1. Considerar el mismo espesor de cerramiento para el conjunto de soluciones, en modo de no entrar en valoraciones de aumento de la superficie o volumen útil, dependientes del lugar donde se ubica el inmueble.
2. Seleccionar materiales aislantes térmicos idénticos en todas las soluciones con los mismos espesores para homogeneizar las propuestas y extraer el resultado más homogéneo posible.
3. En el caso de la propuesta de hormigón armado y acero estructural, dado que el sistema estructural es puntiforme, se ha considerado construir los cerramientos mediante sistema tradicional de ladrillo cerámico hueco para componer las hojas principales de los cerramientos, manteniendo los parámetros expresados anteriormente.
4. Considerar los huecos de la envolvente de idénticas características para igualar la respuesta de los sistemas.
5. Proyectar los mismos sistemas de calefacción, refrigeración y ACS para las tres hipótesis, con el siempre objeto de igualar ventajas e inconvenientes a las soluciones planteadas. Se ha incluido únicamente por vivienda un calentador de ACS. El resto de sistemas no se han incluido en modo que el programa de simulación energética carga tanto la calefacción como la refrigeración para mantener las condiciones de servicio en el interior de los locales habitables.

Con estas premisas de partida, se han obtenido las siguientes calificaciones energéticas, que se expresan para cada muestra estudiada y cada tipología estructural considerada. Dichos resultados los muestran las siguientes figuras.

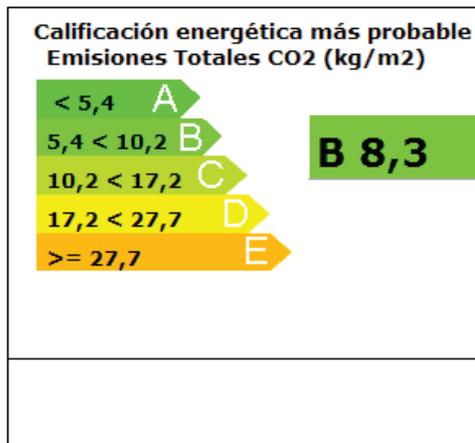


Fig. 116 - Calificación energética por emisiones de CO₂ en vivienda unifamiliar - madera contralaminada

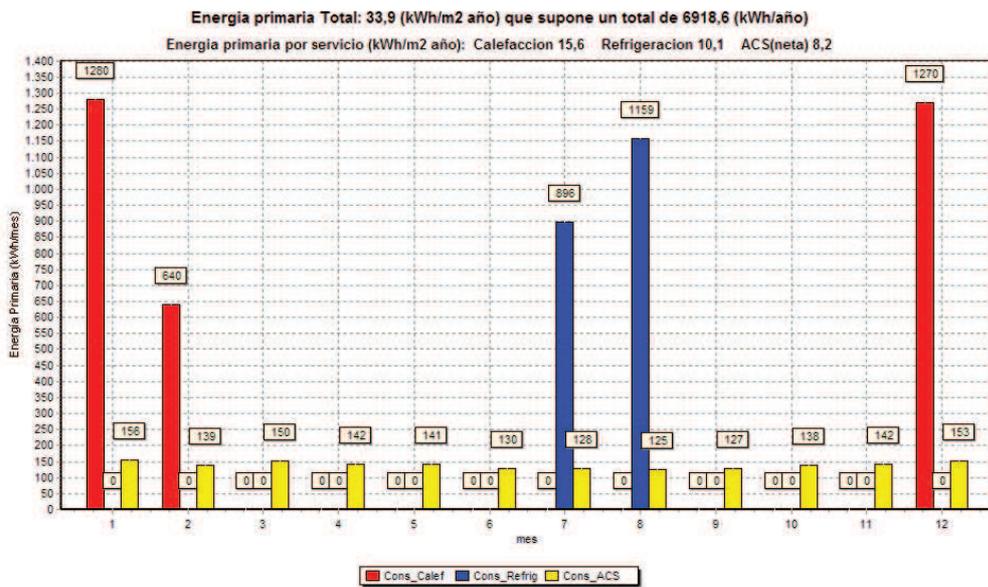


Fig. 117 - Demanda anual de energía primaria en vivienda unifamiliar - madera contralaminada

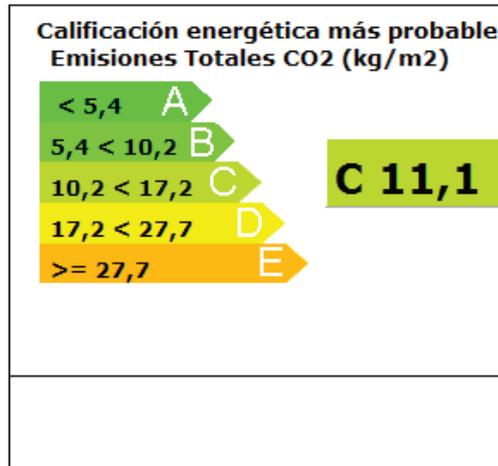


Fig. 118 - Calificación energética por emisiones de CO₂ en vivienda unifamiliar - hormigón armado

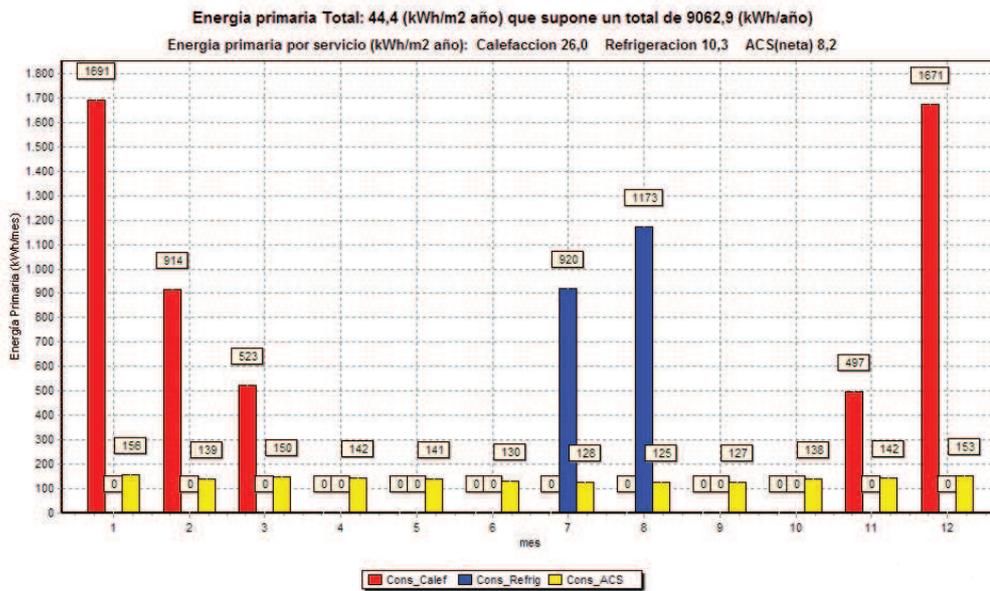


Fig. 119 - Demanda anual de energía primaria en vivienda unifamiliar - hormigón armado

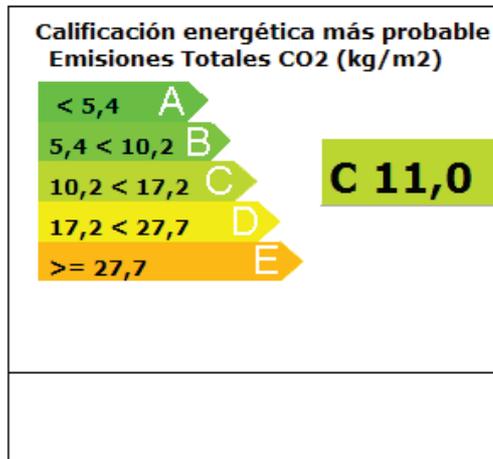


Fig. 120 - Calificación energética por emisiones de CO₂ en vivienda unifamiliar - acero estructural

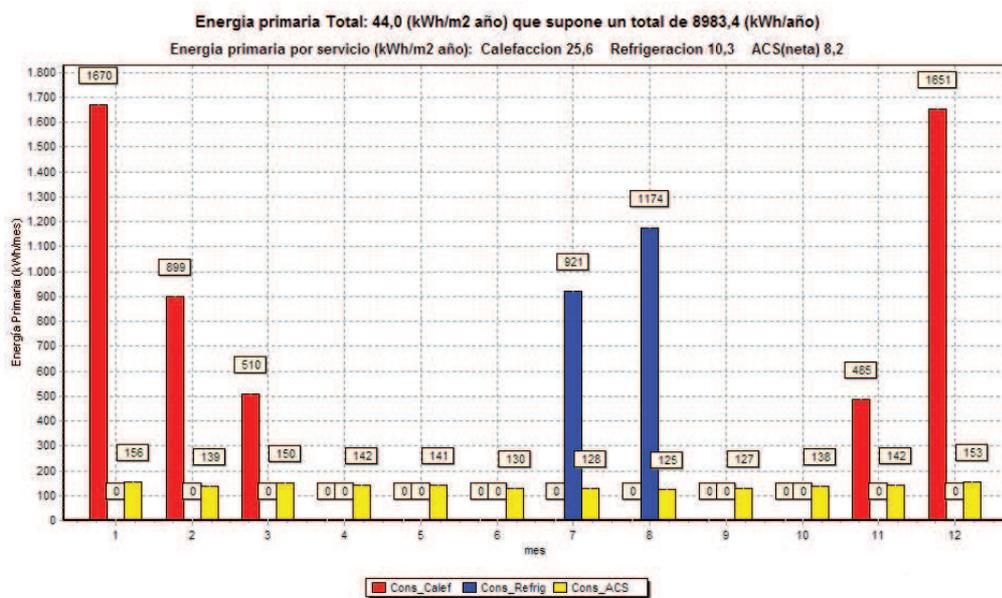


Fig. 121 - Demanda anual de energía primaria en vivienda unifamiliar - acero estructural

La misma metodología se emplea para el cálculo de la energía primaria demandada y emisiones de CO₂ para el edificio de viviendas entre medianeras. Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos.

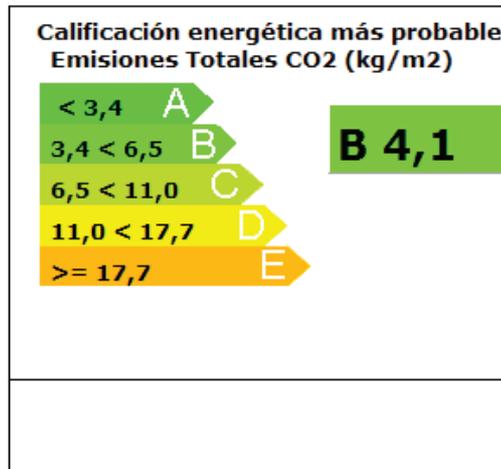


Fig. 122 - Calificación energética por emisiones de CO₂ en edificio de viviendas-madera contralaminada

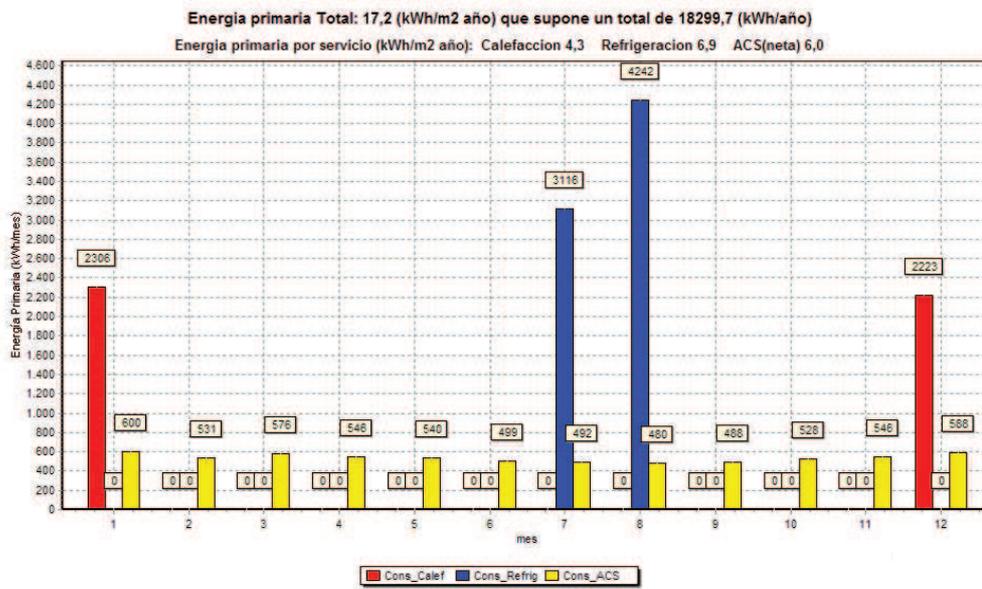


Fig. 123 - Demanda anual de energía primaria en edificio de viviendas - madera contralaminada

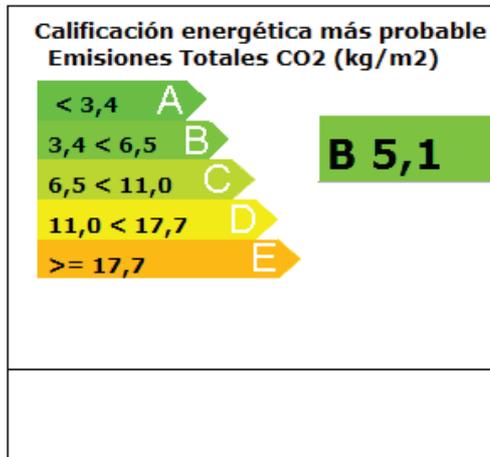


Fig. 124 - Calificación energética por emisiones de CO₂ en edificio de viviendas - hormigón armado

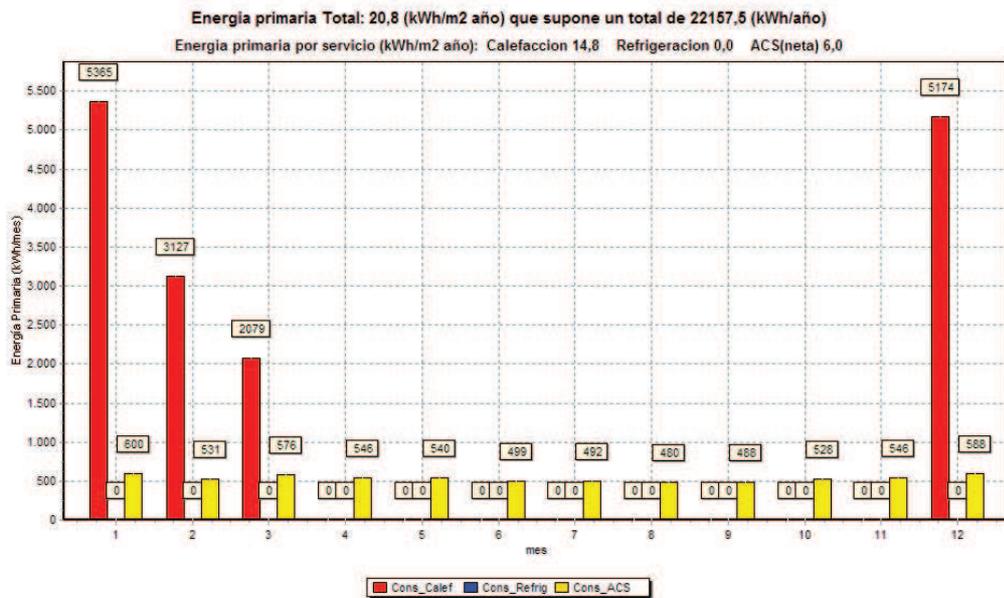


Fig. 125 - Demanda anual de energía primaria en edificio de viviendas - hormigón armado

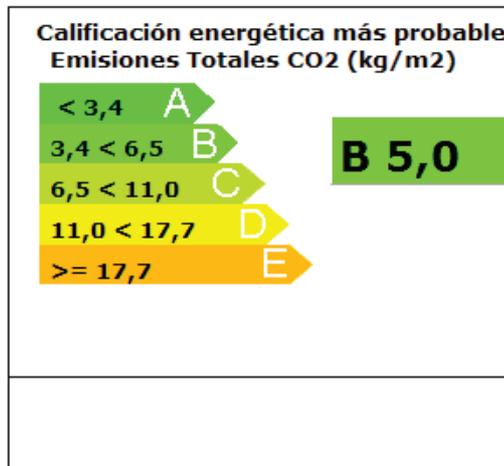


Fig. 126 - Calificación energética por emisiones de CO₂ en edificio de viviendas - acero estructural

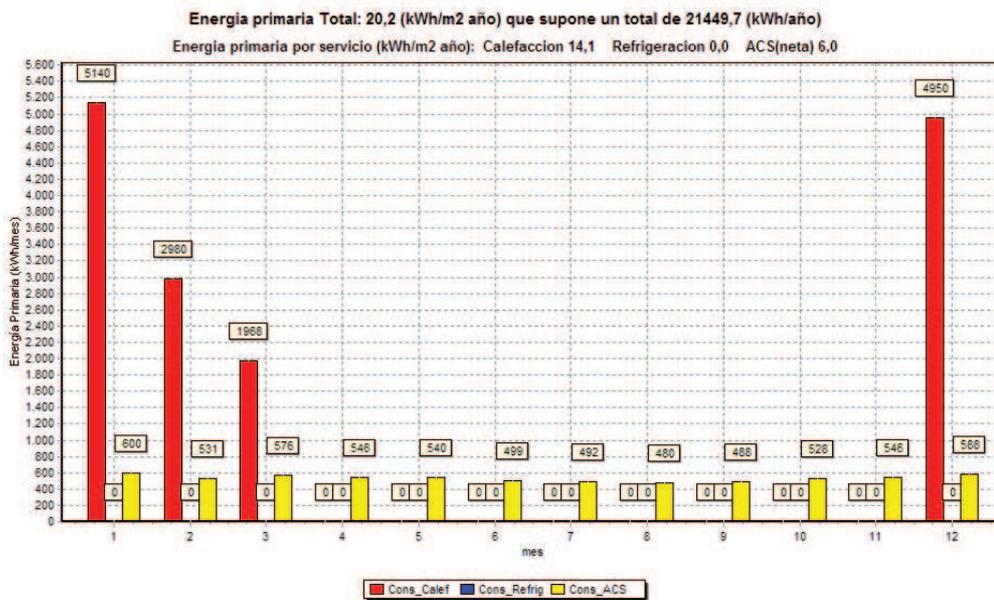


Fig. 127 - Demanda anual de energía primaria en edificio de viviendas - acero estructural

Una vez evaluado el periodo de utilización de los edificios de muestra es posible evaluar el consumo de energía primaria a lo largo de toda la vida útil de la vivienda. Se supone un periodo de 50 años, determinado por DB-SE.

Las hipótesis en este caso pasan por suponer:

1. Un comportamiento homogéneo de los cerramientos y huecos sin pérdida de la capacidad aislante de los mismos.
2. Un rendimiento constante de las instalaciones, tal y como se han proyectado para el inicio de la ocupación de la vivienda.

Con estas premisas de partida podemos suponer un consumo igual en todo el periodo, que podemos reflejar en las siguientes tablas, dependiendo de la muestra utilizada:

Tabla consumo energía primaria durante vida útil vivienda unifamiliar				
Sistema	Consumo Energía Primaria	Periodo	Energía Primaria total por uso	Total energía consumida
	KWh / año	años	KWh / año	MJ
Madera Contralaminada	6.918,60	50	345.930	1.245.348
Hormigón Armado	9.062,90	50	453.145	1.631.322
Acero estructural	8.983,40	50	449.170	1.617.012

Tabla 31 - Consumo energía primaria durante vida útil vivienda unifamiliar

Tabla consumo energía primaria durante vida útil edificio de viviendas				
Sistema	Consumo Energía primaria	Periodo	Energía primaria total por uso	Total energía consumida
	KWh / año	años	KWh / año	MJ
Madera Contralaminada	18.299,70	50	914.985	3.293.946
Hormigón Armado	22.157,50	50	1.107.875	3.988.350
Acero estructural	21.449,70	50	1.072.485	3.860.946

Tabla 32 - Consumo energía primaria durante vida útil edificio de viviendas



5.4. Efecto sumidero y emisiones netas de CO₂



Concluida la evaluación energética en las dos fases de estudio, procede la evaluación del potencial de calentamiento global a través del balance neto de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

A diferencia de los dos sistemas convencionales, donde el proceso de reciclado de los mismos y producción resulta un consumo enorme de energía, en el caso de la madera contralaminada, debemos tener en cuenta el efecto sumidero y considerar a la madera como un agente secuestrador de CO₂ mientras fué árbol. Efectivamente, casi toda la energía que necesita el árbol para crecer la da, gratis, el sol.

Cuando una estructura de madera deja de ser útil, puede quemarse para recoger toda la energía que acumuló mientras crecía. Esta posibilidad, así como su posible reutilización, es bien diferente cuando hablamos de acero estructural u hormigón armado.

Las siguientes figuras muestran la proporción entre biomasa forestal según el Inventario Forestal Nacional II y el secuestro en toneladas de CO₂. (Montero et al. 2005)

	Biomasa aérea				Total aérea	Biomasa radical	Biomasa total
	Fuste	Ramas					
		R > 7 cm	R 2-7 cm	R < 2 cm			
CO ₂ TOTAL IFN2 (1990)	357.775.921	17.545.370	45.901.501	96.186.327	528.528.359	147.225.530	675.753.889
INCREMENTO ANUAL	19.413.111	720.519	2.533.514	4.520.583	27.577.950	7.707.203	35.285.153
EXTRACCIONES CO ₂	4.949.165	149.514	469.504	863.807	6.611.858	1.817.394	8.429.252
INCREMENTO NETO ANUAL	14.463.946	571.005	2.064.009	3.656.776	20.966.092	5.889.809	26.855.901
CO ₂ FIJADO EN 2004	560.271.180	25.539.441	74.797.631	147.381.190	822.053.647	229.682.861	1.051.736.508
CO ₂ FIJADO EN 2008	618.126.942	27.823.461	83.053.669	162.008.293	905.918.015	253.242.098	1.159.160.114
CO ₂ FIJADO EN 2012	675.982.725	30.107.481	91.309.706	176.635.397	989.782.383	276.801.336	1.266.583.719

Fig. 128 - Balance total de biomasa (toneladas de materia seca) para todas las especies de coníferas. (Montero et al. 2005)

	Biomasa aérea				Total aérea	Biomasa radical	Biomasa total
	Fuste	Ramas					
		R > 7 cm	R 2-7 cm	R < 2 cm			
CO ₂ TOTAL IFN2 (1990)	357.775.921	17.545.370	45.901.501	96.186.327	528.528.359	147.225.530	675.753.889
INCREMENTO ANUAL	19.413.111	720.519	2.533.514	4.520.583	27.577.950	7.707.203	35.285.153
EXTRACCIONES CO ₂	4.949.165	149.514	469.504	863.807	6.611.858	1.817.394	8.429.252
INCREMENTO NETO ANUAL	14.463.946	571.005	2.064.009	3.656.776	20.966.092	5.889.809	26.855.901
CO ₂ FIJADO EN 2004	560.271.180	25.539.441	74.797.631	147.381.190	822.053.647	229.682.861	1.051.736.508
CO ₂ FIJADO EN 2008	618.126.942	27.823.461	83.053.669	162.008.293	905.918.015	253.242.098	1.159.160.114
CO ₂ FIJADO EN 2012	675.982.725	30.107.481	91.309.706	176.635.397	989.782.383	276.801.336	1.266.583.719

Fig. 129 - Balance CO₂ (T) para todas las especies coníferas peninsulares. (Montero et al. 2005)

Según las figuras anteriores, se puede obtener un secuestro de CO₂ por los bosques españoles de **1,8556** Kg CO₂ / Kg siempre en madera de conífera, que es la utilizada en los tableros de madera contralaminada.

Por otro lado, a las emisiones del periodo de utilización calculadas por el programa CERMA (CERMA, 2013) hay que añadir las emisiones del periodo de construcción. A la energía primaria demandada se le aplica un coeficiente de paso según la siguiente tabla, cuyos valores se han recogido del documento reconocido Factores de Emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España (Ministerio de Industria, energía y turismo, 2014):

Tabla cálculo de coeficiente de paso homogeneizado			
Tipo de energía	Proporción	Coeficiente de paso	Valor homogeneizado
			Kg CO ₂ / KWh energía final
Electricidad	55%	0,399	0,219
Gas Natural	35%	0,252	0,088
Gasóleo	10%	0,311	0,031
TOTAL			0,338

Tabla 33 - Cálculo de coeficiente de paso homogeneizado

Dado que los costes energéticos de extracción, transformación y puesta en obra de los elementos ligneos está ya contabilizada anteriormente en el apartado de energía consumida durante el proceso de edificación, podemos afirmar un balance de emisiones neto según las tablas siguientes, según la muestra utilizada de vivienda.

Para el paso de energía primaria de construcción a energía final se ha utilizado la misma publicación con una proporción idéntica de homogeneización de energías utilizadas (Ministerio de Industria, energía y turismo, 2014).

Tabla cálculo de emisiones netas de CO₂ en vivienda unifamiliar

Concepto	Uds.	Madera CLT	Hormigón Armado	Acero estructural
Energía primaria construcción	KWh	111.239	157.948	325.401
Energía final construcción	KWh	58.845	83.554	172.137
Coef. de paso		0,338	0,338	0,338
Emisiones CO ₂ construcción	Kg CO ₂	19.890	28.241	58.182
Emisiones anuales CO ₂ utilización	Kg CO ₂ / año	1.699	2.268	2.247
periodo	años	50	50	50
Emsiones CO ₂ utilización	Kg CO ₂	84.935	113.395	112.340
efecto sumidero	Kg CO ₂ / Kg madera	1,8556	0	0
masa	Kg	19.437	71.499	38.052
efecto sumidero	Kg CO ₂	36.067	0	0
emisiones totales	Kg CO ₂	68.757	141.636	170.522

Tabla 34 - Cálculo de emisiones netas de CO₂ en edificio de vivienda unifamiliar

Tabla cálculo de emisiones netas de CO₂ en edificio de viviendas entre medianeras

Concepto	Uds.	Madera CLT	Hormigón Armado	Acero estructural
Energía primaria construcción	KWh	487.991	639.647	1.612.121
Energía final construcción	KWh	258.147	338.373	852.812
Coef. de paso		0,338	0,338	0,338
Emisiones CO ₂ construcción	Kg CO ₂	87.254	114.370	288.251
Emisiones anuales CO ₂ utilización	Kg CO ₂ / año	4.335	5.479	5.291
período	años	50	50	50
Emisiones CO ₂ utilización	Kg CO ₂	216.770	273.965	264.560
efecto sumidero	Kg CO ₂ / Kg madera	1,8556	0	0
masa	Kg	159.388	337.834	207.596
efecto sumidero	Kg CO ₂	295.760	0	0
emisiones totales	Kg CO ₂	8.263	388.335	552.811

Tabla 35 - Cálculo de emisiones netas de CO₂ en edificio de viviendas entre medianeras





5.5. Discusión de resultados



De las dos categorías de impacto estudiadas, energía primaria y potencia de calentamiento global, iniciaremos la discusión, por la propia metodología utilizada, en la categoría de impacto de energía primaria consumida en los dos periodos sometidos a evaluación.

Para dicha categoría de impacto, se muestran las figuras siguientes que resumen junto con las tablas resumen adjuntas de los apartados anteriores, la demanda de cada uno de los periodos, para posteriormente reflejarlos en modo conjunto.

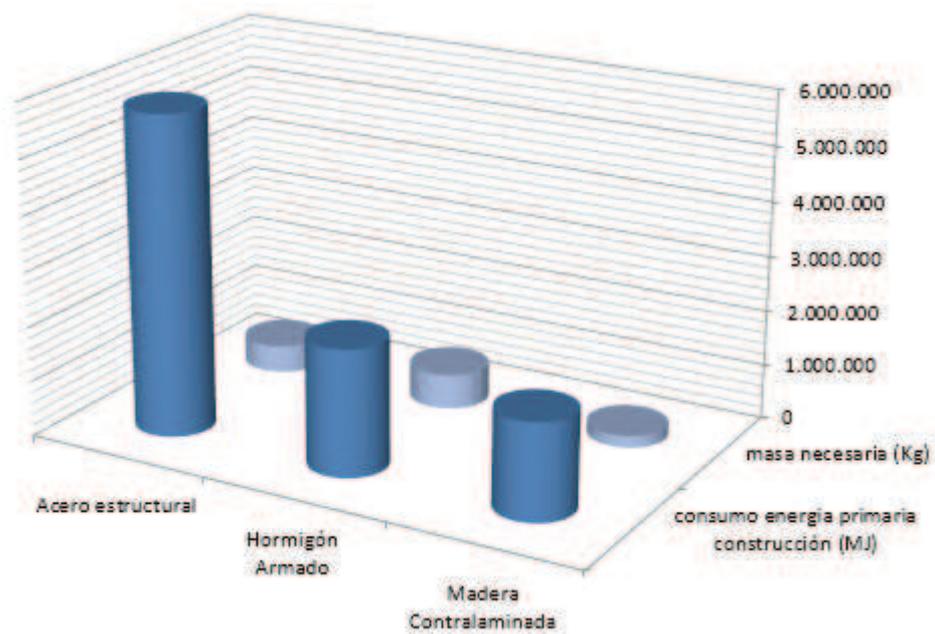


Fig. 130 - Energía primaria periodo de construcción y masa necesaria para vivienda unifamiliar aislada

Junto con la energía primaria de construcción se ha contemplado un aspecto importante en la ejecución de edificios, que es la masa que incorporan bien sea la estructura, que el sistema de cerramientos del edificio. La discusión de dichos resultados se realiza posteriormente.

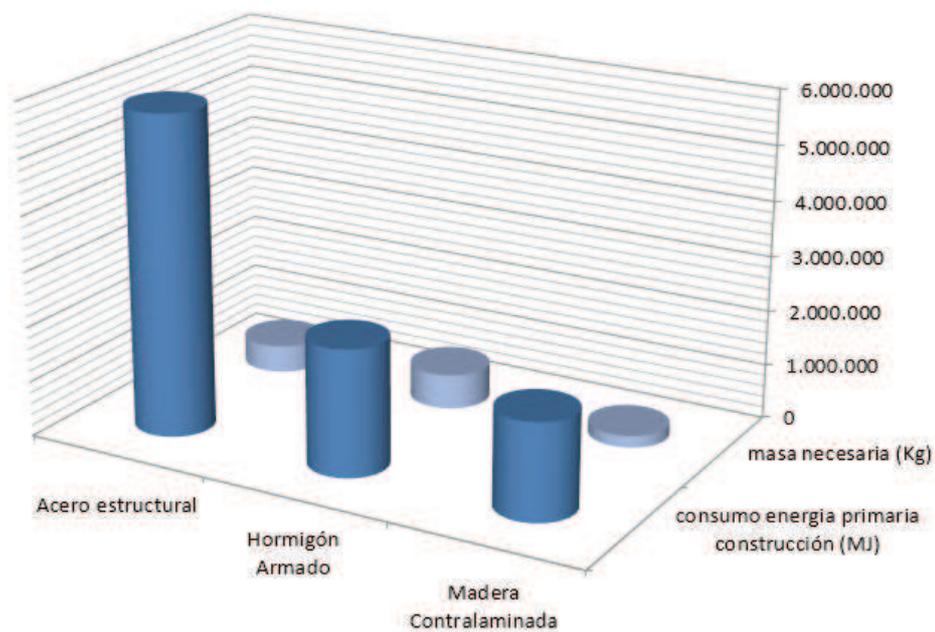


Fig. 131 - Energía primaria periodo de construcción y masa necesaria para edificio de viviendas

El detalle de las figuras anteriores se puede resumir en las siguientes tablas, que individualizan los resultados energéticos entre estructura y cerramientos de cada sistema estructural.

Tabla de energía primaria periodo de construcción y masa necesaria para vivienda unifamiliar aislada

Sistema	Masa necesaria Construcción Kg	Consumo E. Primaria Construcción MJ
Madera Contralaminada	40.585	400.573
<i>estructura</i>	19.912	95.537
<i>cerramientos</i>	20.673	305.036
Hormigón Armado	146.939	568.772
<i>estructura</i>	74.874	169.689
<i>cerramientos</i>	72.065	399.083
Acero estructural	110.117	1.171.773
<i>estructura</i>	38.052	772.690
<i>cerramientos</i>	72.065	399.083

Tabla 36 - Energía primaria periodo de construcción y masa necesaria para vivienda unifamiliar aislada

Tabla de energía primaria periodo de construcción y masa necesaria para edificio de viviendas entre medianeras

Sistema	Masa necesaria Construcción	Consumo E. Primaria Construcción
	Kg	MJ
Madera Contralaminada	214.755	1.757.259
<i>estructura</i>	159.863	655.341
<i>cerramientos</i>	54.892	1.101.918
Hormigón Armado	630.700	2.303.375
<i>estructura</i>	337.834	765.966
<i>cerramientos</i>	292.865	1.537.409
Acero estructural	500.461	5.805.263
<i>estructura</i>	207.596	4.267.854
<i>cerramientos</i>	292.865	1.537.409

Tab 37 - Energía primaria periodo de construcción y masa necesaria para edificio de viviendas

La madera contralaminada es el sistema constructivo que menor cantidad de energía demanda para la construcción de la vivienda unifamiliar, respecto de los sistemas en hormigón armado y acero estructural, con un ahorro del 30% y del 60% respectivamente, siendo el acero estructural el mas penalizado.

Para el caso del edificio de viviendas entre medianeras, continua siendo el sistema en madera contralaminada el menor demandante de energía, con un ahorro del 24% en el caso de hormigón armado y del 70% en el caso de acero estructural.

En materia de masa introducida al terreno, en el caso de la vivienda unifamiliar, la madera contralaminada ofrece una reducción en la masa de la estructura y cerramientos de un 63% en su comparativa con el acero estructural, siendo el hormigón armado en este aspecto el que mayor masa introduce, y el ahorro se traduce en un 72% en masa.

Para el caso del edificio de viviendas entre medianeras, los porcentajes descritos en el párrafo anterior, se reducen un 6% en los dos casos, siendo la madera contralaminada la que menor masa demanda.

Este hecho permite intervenir con un mejor resultado en terrenos donde la tensión admisible sea escasa, y donde la aplicación de los dos restantes sistemas estructurales

sea más difícil de adoptar en orden de favorecer una mayor seguridad al edificio, sin tener que realizar mejoras en el terreno por inyección de resinas, jet-grouting o similar.

Concluida la discusión de resultados de energía primaria de construcción y masa introducida, conviene hacer lo consiguiente incluyendo los resultados de energía primaria de utilización y el porcentaje que ambas energías representan en el global del ACV.

Las tablas y figuras siguientes muestran los resultados obtenidos en la experimentación de las dos muestras utilizadas.

Tabla consumo total de energía primaria en la edificación de vivienda unifamiliar

Sistema	Consumo E. Primaria construcción	Consumo E. Primaria utilización	% constr.	% utilización	total Energía Primaria
	MJ	MJ	%	%	MJ
Madera Contralaminada	400.573	1.245.348	24,34%	75,66%	1.645.921
Hormigón Armado	568.772	1.631.322	25,85%	74,15%	2.200.094
Acero estructural	1.171.773	1.617.012	42,02%	57,98%	2.788.785

Tabla 38 - Consumo total de energía primaria en la edificación de vivienda unifamiliar

Tabla consumo total de energía primaria en la edificación de edificio de viviendas

Sistema	Consumo E. Primaria construcción	Consumo E. Primaria utilización	% constr.	% utilización	total Energía Primaria
	MJ	MJ	%	%	MJ
Madera Contralaminada	1.757.259	3.293.946	34,79%	65,21%	5.051.205
Hormigón Armado	2.303.375	3.988.350	36,61%	63,39%	6.291.725
Acero estructural	5.805.263	3.860.946	60,06%	39,94%	9.666.209

Tabla 39 - Consumo total de energía primaria en la edificación de edificio de viviendas

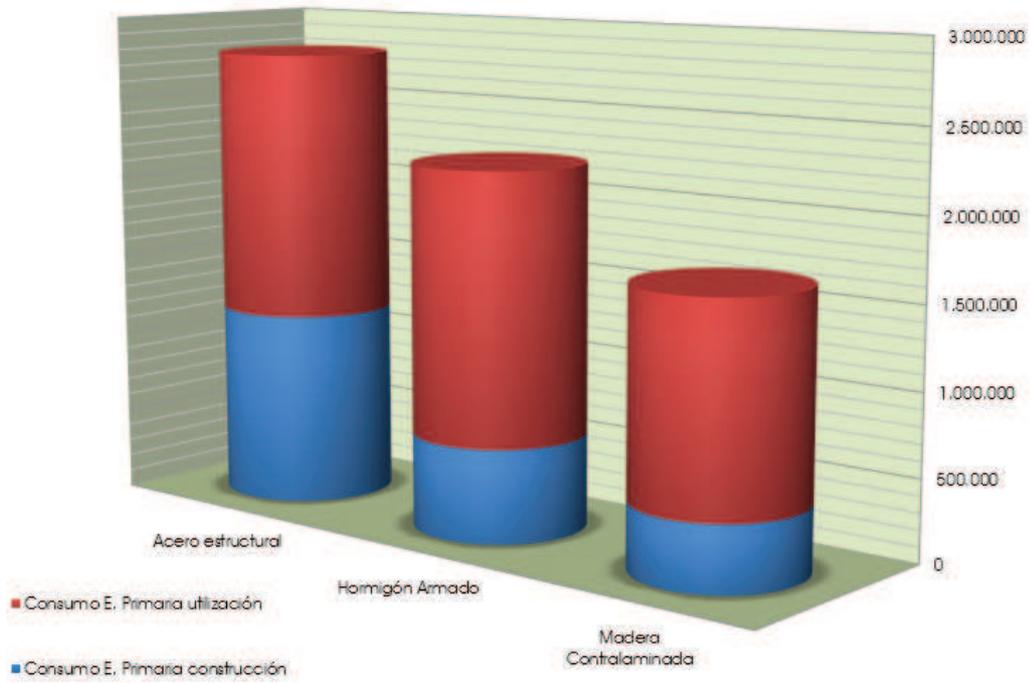


Fig. 132 - Consumo de energía primaria en la edificación de vivienda unifamiliar

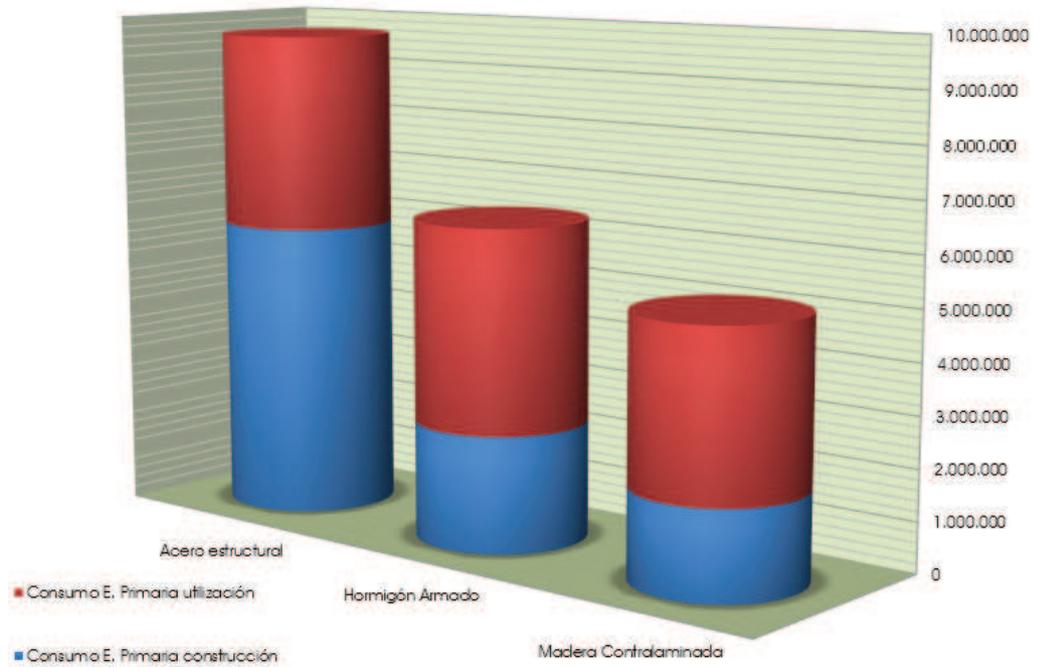


Fig. 133 - Consumo de energía primaria en la edificación de edificio de viviendas

Con la inclusión de la energía primaria del periodo de utilización, el abanico de resultados y su combinatoria aumenta considerablemente, si bien el sistema de madera contralaminada obtiene menores demandas energéticas en todos los apartados objeto de estudio.

El primer resultado relevante es la importancia del periodo de construcción en el global de energía primaria, representando en el caso de la vivienda unifamiliar entre un 24% y un 25% para la madera contralaminada y hormigón armado, mientras que la construcción en acero estructural supone un 42% del total. Este valor coincide con los resultados del proyecto Improbuiding (Fig. 115)

En el caso del edificio de viviendas la situación se agrava para el acero, representando únicamente la construcción, el 60% del total y superando incluso al periodo de utilización. En cambio, para esta muestra de edificio, madera contralaminada y hormigón representan un 35% y 37% respectivamente.

Este incremento en el porcentaje de la energía primaria de construcción se debe a la propia tipología del edificio, donde existe en el caso del edificio de viviendas una gran cantidad de cerramiento en relación a su superficie, con un coeficiente de compacidad menor que la vivienda unifamiliar.

Otro resultado que resulta no menos importante son los valores absolutos de los diferentes tipos de energía dependiendo del periodo de evaluación. De este modo, para la vivienda unifamiliar, la misma energía que la vivienda consumirá durante los cincuenta años de vida útil, es la misma que se requiere para la construcción de estructura y cerramientos en acero estructural.

Esta situación se agrava todavía más en el edificio de viviendas, donde únicamente la construcción en acero supera la demanda de energía primaria en periodo de utilización del edificio en madera contralaminada en un 76%.

En valores globales, incluyendo los dos periodos de evaluación objeto de estudio, la madera contralaminada ofrece un ahorro energético del 25% y del 41% para hormigón armado y acero respectivamente, mientras que en el caso del edificio de viviendas, se sitúan en un 20% y un 48% respectivamente.

Concluida la primera categoría de impacto, se procede a la discusión de los resultados obtenidos en el Potencial de Calentamiento Global, expresado en Kg de CO₂ de emisiones a la atmósfera de cada una de las muestras.

El resultado, como se puede apreciar de las figuras objeto de resultado de dicho apartado, es una reducción que va, en la muestra de vivienda unifamiliar, desde el 51% de ahorro en emisiones en comparación con la estructura de hormigón armado, llegando al 60% para el acero estructural.

En el caso de la muestra del edificio de viviendas entre medianeras, el ahorro en emisiones es mucho mayor, llegando a tasas del 97% para el hormigón armado y del 98% de ahorro en comparación con la estructura de acero estructural.

Este ultimo conjunto de resultados resultan realmente reveladores, ya que, si un ahorro en la huella de carbono, para viviendas unifamiliares, de entre el 50-60% supone un gran avance en materia de emisiones, en el caso de edificios de viviendas, donde el sistema estructural en madera contralaminada es masivo y tiene una presencia mayor. Considerando este aspecto, junto con el efecto sumidero de la madera, generan un beneficio en huella de carbono que prácticamente anula el resto de emisiones globales generadas por el edificio.

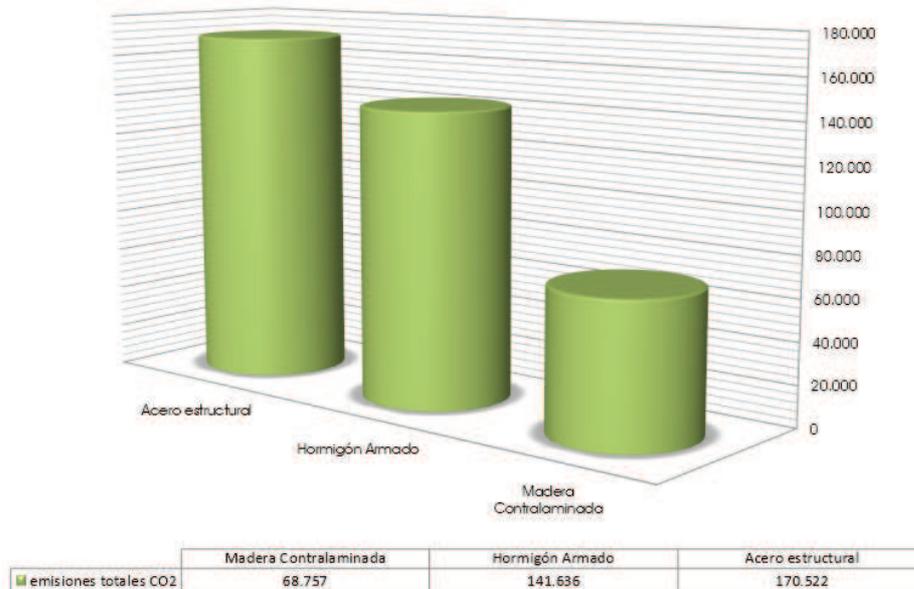


Fig. 134 - Emisiones netas de CO₂ en vivienda unifamiliar aislada

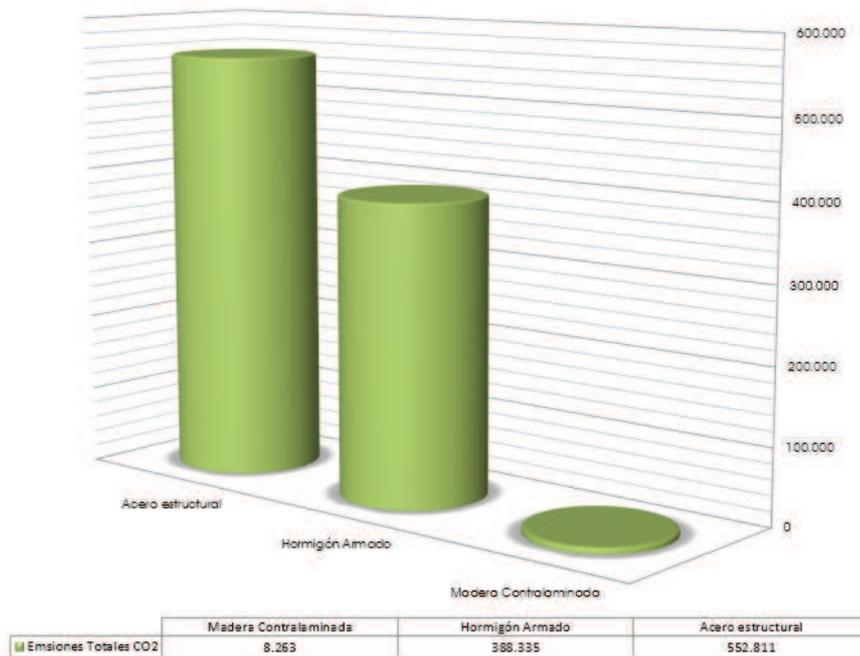


Fig. 135 - Emisiones netas de CO₂ en edificio de viviendas entre medianeras

Multiplicando estos ahorros en emisiones por el número de viviendas en la UE-27 (O V V, 2011) y por el porcentaje que cada tipología de vivienda representa respecto del total (Françoise Nemry et al., 2008), se puede calcular el ahorro en huella de carbono que hubiera supuesto la construcción madera contralaminada. La tabla siguiente muestra el total.

Tabla ahorro en emisiones del parque de viviendas en la UE-27

Tipología	Cantidad	Emisiones por vivienda	Emisiones totales	Ahorro	Subtotal Ahorro
		Kg CO ₂	Mt CO ₂	%	Mt CO ₂
Total	202.225.000				
Unifamiliar	107.179.250	141.636	15.180	51%	7.741,80
Plurifamiliar	95.045.750	38.833	3.690	97%	3.580,18
				TOTAL	11.321,98

Tabla 40 - Ahorro en emisiones del parque de viviendas en la UE-27





6. MODELIZACIÓN MATEMÁTICA PARA EL ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD EN EL USO MASIVO DE LA MADERA CONTRALAMINADA EN EL SECTOR EDIFICACIÓN. EL CASO DE ESPAÑA.



Según los resultados obtenidos en el apartado anterior, queda acreditada una mayor eficiencia estructural de los paneles de madera contralaminada frente a los sistemas convencionales de estructuras de edificación. De este modo, la utilización de madera contralaminada supone un ahorro en energía primaria y emisiones de CO₂ frente a sistemas tradicionales de entramado en hormigón armado y acero estructural.

Pero para validar una completa sostenibilidad del sistema, se requiere demostrar la viabilidad productiva continuada de los bosques españoles para entregar material suficiente a un sector edificación completo en el ámbito nacional.

De este modo, se plantea una modelización matemática que tenga en cuenta las numerosas variables que afectan al proceso y que ofrezca un resultado ajustado de la sostenibilidad de los bosques españoles en diversos escenarios de corta y productividad.

La investigación presentada en el actual apartado, está publicada en la revista de investigación *Clean Technologies and Environmental Policy*, con DOI **10.1007/s10098-014-0738-3** (Fernández M. et al., 2014), y citada posteriormente en diferentes publicaciones científicas (Kasthurba A.K. & Reddy K. R., 2014) (Gámez-García D.C. et al., 2015).



6.1. Modelización matemática.



Para realizar un cálculo riguroso del problema y abandonar modelos determinísticos, se utiliza la modelización matemática mediante iteraciones del sistema para el periodo de cálculo. Para justificar la viabilidad de la propuesta, será necesario demostrar la sostenibilidad en el uso de la madera como material masivo de construcción, tanto para la estructura como para el cerramiento de los edificios. Finalmente, se han propuesto diferentes escenarios y estrategias, tomando como variables clave del proceso el crecimiento natural de los bosques, y la tasa de derrocamiento de vivienda. Por otro lado, la tasa de extracción ha sido la variable de estrategia utilizada, para mantener la sostenibilidad de los sectores edificación y maderero.

Los objetivos del presente modelo son básicamente dos:

1.- Analizar la sostenibilidad del uso masivo de la madera contralaminada de conífera en edificación. El primer paso ha sido realizar un análisis de la producción forestal arbolada en los bosques españoles, con los elementos que afectan positiva o negativamente a la producción natural, así como de las causas y los factores que intervienen en la reforestación hidrológica. El resto del modelo trata de establecer la posible demanda de madera en el conjunto del sector edificación. Para ello, se ha generado un diagrama con cinco niveles entre los que cabe distinguir la evolución de la población y un completo sistema inmobiliario en el conjunto de la nación. La producción de madera y corta para los usos descritos componen el resto del modelo.

2.- Proponer dos escenarios de corta sostenible en la superficie arbolada. De este modo, el primer escenario propone la actual tasa de extracción, mientras el segundo llega un poco más allá y trata de extraer no sólo la demanda del sector edificación, sino el necesario para toda la industria de la madera, en modo de no necesitar realizar importaciones.

De este modo, la variable de nivel correspondiente a la madera transformada para uso en edificación, *me*, es la que nos dirá la sostenibilidad o no del modelo. Será necesario para garantizar dicha sostenibilidad que deba soportar la demanda potencial del sector y hacer un uso sostenible de los bosques.



6.2. Programación del modelo, variables y ecuaciones.



Programación del modelo

Para el cálculo riguroso del problema se ha utilizado una validación por computadora debido al elevado número de ecuaciones a resolver. En concreto, se ha utilizado el programa de cálculo Wolfram Mathematica (Universitat Politècnica de València, 2014).

Se ha realizado una programación matemática que puede dar respuesta a los problemas planteados, generando una demanda de ocupación de vivienda vacía y transformando ésta en vivienda ocupada como variables de nivel principales del mercado inmobiliario. A su vez, estos dos grandes niveles vienen afectados por variables que deducen viviendas de ambos respectivamente, como el derrocamiento o la desocupación de vivienda. Finalmente, la variable que representa la actividad rehabilitadora en edificación, incorpora su demanda de madera anualmente en forma de m^3VCC . En cambio, la ocupación que generan las viviendas generadas por su actividad, se hallan incluidas en la demanda de obra nueva, por motivos de operatividad del modelo. Se adjunta a continuación el diagrama hidrodinámico que refleja el modelo completo, así como las variables que lo componen.

Mediante la programación se han propuesto diferentes escenarios y estrategias, tomando como variables clave del proceso el crecimiento natural de los bosques, y la tasa de derrocamiento de vivienda, mientras que la tasa de extracción ha sido la variable de estrategia utilizada, para mantener la sostenibilidad de los sectores edificación y maderero.

Se propone pues, en una primera estrategia, la actual tasa de extracción de madera, del 41,38%, muy baja en comparación con otros países de la UE-27, para la utilización de coníferas en estructuras de edificación en España. Éstas representan aproximadamente el 48,61% de la regeneración de volumen maderable con corteza producido en el país anualmente. Añadido a estos dos coeficientes, el 36% es de uso y aprovechamiento para la producción de madera aserrada para la fabricación de tableros de madera contralaminada.

La segunda estrategia, sin embargo, llega un poco más allá y trata de extraer no sólo la demanda del sector edificación, sino el necesario para toda la industria de la madera en España, incluyendo la demanda de papel, pastas, productos madereros para sector mueble, así como confección de tableros de partículas, en modo de no

Variables utilizadas

Se describen en la siguientes tablas, las variables utilizadas en el cálculo. Se dividen en dos grandes grupos. Dependiendo de su origen, se clasificarán en:

-Variables **input**. Serán aquellas variables independientes del fenómeno, o variables exógenas. En este grupo están incluidas las variables de control, que luego se escogen para la generación de escenarios

-Variables **output**. Tendrán esta consideración aquellas variables dependientes a su vez de otras. Entran en este grupo las denominadas variables endógenas.

En las siguientes tablas vienen ordenadas por grupo, con las unidades correspondientes.

Tabla de variables input de modelo matemático					
Variable	Descripción	Unidades	Variable	Descripción	Unidades
<i>emi</i>	emigración	personas	<i>tda</i>	tasa de derrocamiento de vivienda	
<i>inm</i>	inmigración	personas	<i>tdc</i>	tasa defunciones	
<i>mba</i>	madera ctual bosques	m ³ VCC	<i>tds</i>	tasa demanda resto del mercado	
<i>pl</i>	plantación	m ³ VCC	<i>tdv</i>	tasa de desocupación vivienda	
<i>rf</i>	re población forestal	m ³ VCC	<i>tfa</i>	tasa del número de familias	
<i>tap</i>	tasa de aprovechamiento coníferas uso estructural		<i>ti</i>	tasa de incendios	
<i>tap2</i>	tasa de aprovechamiento para resto usos sector madera		<i>tna</i>	tasa nacimientos	
<i>tci</i>	tasa corta ilegal		<i>tov</i>	tasa ocupación vivienda	
<i>tcn</i>	tasa de crecimiento natural		<i>treha</i>	tasa de rehabilitación	
<i>tconst</i>	tasa de construcción				

Tabla 41 - Variables input de modelo matemático. Elaboración realizada por el autor.

Tabla de variables output de modelo matemático

Variable	Descripción	Uds.	Variable	Descripción	Uds.
<i>ci</i>	corta ilegal	m ³ VCC	<i>nfa</i>	número de familias	familias
<i>cn</i>	crecimiento natural	m ³ VCC	<i>ovc</i>	ocupación de vivienda construida	viviendas
<i>cvi</i>	construcción de viviendas	viviendas	<i>pn</i>	producción natural madera	m ³ VCC
<i>dcv</i>	desocupación de viviendas	viviendas	<i>pna</i>	producción natural madera anual	m ³ VCC
<i>ddv</i>	derrocamiento de viviendas	viviendas	<i>pob</i>	población	personas
<i>def</i>	defunciones	personas	<i>poba</i>	población anual	personas
<i>dpreha</i>	demanda positiva rehabilitación		<i>rehaviv</i>	rehabilitación de viviendas	
<i>dpv</i>	demanda positiva de viviendas		<i>tm</i>	tala de madera de conífera para construcción	m ³ VCC
<i>drs</i>	consumo resto del mercado madera y papel	m ³ VCC	<i>tm2</i>	tala de madera para otros usos	m ³ VCC
<i>if</i>	incendios forestales	m ³ VCC	<i>tmt</i>	tasa de madera total	
<i>m2</i>	madera talada resto de usos	m ³ VCC	<i>uon</i>	uso en obra nueva	m ³ VCC
<i>m2a</i>	madera talada resto de usos anual	m ³ VCC	<i>ure</i>	uso madera rehabilitación vivienda	m ³ VCC
<i>mt</i>	madera total = mab + pn	m ³ VCC	<i>vio</i>	viviendas ocupadas	viviendas
<i>mte</i>	madera talada para edificación	m ³ VCC	<i>vif</i>	viviendas totales = vio + viv	viviendas
<i>mtea</i>	madera talada para edificación anual	m ³ VCC	<i>viv</i>	viviendas vacías	viviendas
<i>nac</i>	nacimientos	personas			

Tabla 42 - Variables output de modelo matemático. Elaboración realizada por el autor.

Valores introducidos en la programación para las distintas variables

Se describen a continuación en la tabla 43 los valores iniciales de las variables del modelo.

Tabla de valores iniciales usados en la modelización matemática

Variable	Valor	Variable	Valor	Variable	Valor	Variable	Valor
<i>t0</i>	2009	<i>tcn</i>	0,0325	<i>tap2</i>	0,3414	<i>treha</i>	25,55
<i>dt</i>	1	<i>mte0</i>	0	<i>tdrs</i>	0,3348	<i>tov</i>	3,31
<i>T</i>	40	<i>mtea0</i>	0	<i>tna</i>	0,00832	<i>tdv</i>	0,00005
<i>pl</i>	12.918.080	<i>m20</i>	0	<i>inm</i>	386.466	<i>tdc</i>	0,000758
<i>rf</i>	3.064.750	<i>m2a0</i>	0	<i>emi</i>	324.203	<i>pob0</i>	45,828,172
<i>ti</i>	0,1038	<i>mab</i>	927.761.315	<i>tde</i>	0,0085	<i>poba0</i>	0
<i>pn0</i>	20.801.443	<i>ici</i>	0,1135	<i>tfa</i>	2,74	<i>viv0</i>	2,525,000
<i>pna0</i>	20.801.443	<i>tap</i>	0,0724	<i>tconst</i>	38,55	<i>vio0</i>	22,525,917

Tabla 43 - Valores iniciales usados en la modelización matemática. Elaboración realizada por el autor.

Ecuaciones del modelo matemático

A continuación se enuncia el sistema de ecuaciones empleado en el modelo matemático. Se inicia el listado con las variables de flujo apoyadas de las variables auxiliares, para finalizar con las variables de nivel correspondientes al diagrama hidrodinámico formulado.

Ecuación	Número
$mt(t) = mab(t) + pn(t-dt)$	(1)
$tm(t) = 0.005 : mt(t) > 1\ 238\ 652\ 815$	(2)
$tm(t) = 0.005 : mt(t) \leq 1\ 238\ 652\ 815$	(3)
$cn(t) = mt(t) + dt * (tcn + tm)$	(4)
$ci(t) = ici * (cn + pl + rf) (t-dt)$	(5)
$tm(t) = tap * (cn + pl + rf) (t-dt)$	(6)
$tm2(t) = tap2 * (cn + pl + rf) (t-dt)$	(7)
$nac(t) = tna * pob (t-dt)$	(8)
$def(t) = tde * pob (t-dt)$	(9)

Ecuación	Número
$nfa(t) = poba(t-dt) / tfa$	(10)
$ovc(t) = nfa(t) * tov$	(11)
$vit(t) = viv(t-dt) + vio(t-dt)$	(12)
$dcv(t) = tdv * vit(t)$	(13)
$ddv(t) = tdd * vit(t)$	(14)
$dpv(t) = 0.0044 : viv(t-dt) < 500\ 000$	(15)
$dpv(t) = 0.00018 : viv(t-dt) \geq 500\ 000$	(16)
$cvi(t) = dpv(t) * vit(t)$	(17)
$uon(t) = cvi(t) * tconst$	(18)
$dpreha(t) = 0.00002579 * (vit(t) / 1\ 000\ 000)$	(19)
$rehaviv(t) = dpreha(t) * vit(t)$	(20)
$ure(t) = rehaviv(t) * treha$	(21)
$pn(t) = pn(t-dt) + dt * (cn(t) + rf(t) + pl(t) - ci(t) - tm(t) - tm2(t) - if(t))$	(22)
$pna(t) = pna0 + dt * (cn(t) + rf(t) + pl(t) - ci(t) - tm(t) - tm2(t) - if(t))$	(23)
$mte(t) = mte(t-dt) + dt * (tm(t) - uon(t) - ure(t))$	(24)
$mtea(t) = dt * (tm(t) - uon(t) - ure(t))$	(25)
$m2(t) = m2(t-dt) + dt * (tm2(t) - drs(t))$	(26)
$m2a(t) = dt * (tm2(t) - drs(t))$	(27)
$pob(t) = pob(t-dt) + dt * (nac(t) + inm(t) - def(t) - emi(t))$	(28)
$poba(t) = dt * (nac(t) - def(t) + inm(t) - emi(t))$	(29)
$viv(t) = viv(t-dt) + dt * (cvi(t) - ovc(t) + dcv(t) - ddv(t))$	(30)
$vio(t) = vio(t-dt) + dt * (ovc(t) - dcv(t))$	(31)

Este conjunto de ecuaciones se introducen, junto con los valores iniciales de las variables, en el programa informático Wolfram Mathematica (Universitat Politècnica de València, 2014) para realizar el cálculo iterativo durante el periodo fijado en el modelo, que es de 40 años a contar desde 2009, año del cual se han obtenido la mayoría de datos en el apartado antecedentes.





6.3. Validación del modelo.



Una vez formulado el modelo matemático, en el presente apartado se validará matemáticamente. La tarea principal consistirá en elegir un periodo de prueba y la elección de los datos de partida a introducir en el programa.

En el modelo utilizado para la validación, se ha escogido como periodo de comparación el desarrollado entre 1980-2009, para su comparación con datos históricos (Inventario forestal nacional 3, 2005).

Así pues, se han tenido en cuenta los siguientes cálculos para estimar los valores iniciales de las variables implicadas:

-Existencias y crecimiento

- Existencias VCC en el año 1980 en superficie arbolada – 488.114.662 m³ VCC.
- Crecimiento anual del volumen de madera 1980 – 31.025.000 m³ VCC.

-Reforestación

- Periodo 1980-1989: Se reforestaron 535.100 Ha equivalentes a 26.755.000 m³ VCC
- Periodo 1990-1999: Se reforestaron 1.216.200 Ha equivalentes a 60.810.000 m³ VCC
- Periodo 2000-2006: Se reforestaron 440.400 Ha equivalentes a 22.020.000 m³ VCC

Obteniendo la media y proyectándola hacia nueve años para cumplir el periodo, se extrapola un valor: $440.400 / 6 \text{ años} = 73.400 \text{ Ha} / \text{año} \times 9 \text{ años} \times 50 \text{ m}^3/\text{año} = 33.030.000 \text{ m}^3 \text{ VCC}$

Total periodo = $120.595.000 \text{ m}^3 / 30 \text{ años} = 4.019.833 \text{ m}^3 \text{ VCC} / \text{año}$

-Plantación, bien sea pública o privada.

- Volumen de plantación 1980 – 51.142.500 m³ VCC
- Volumen de plantación 2009 – 114.170.000 m³ VCC

Obtenemos pues un volumen anual de 5.510.416 m³ VCC anuales destinados a plantación.

-Incendios forestales

Sumando los tres periodos que abarcan los treinta años obtenemos una superficie calcinada de 66.167 Ha anuales, equivalentes a 3.308.333 m³ VCC deducidos en concepto de incendios forestales.

-Parque de viviendas

Según estadísticas del INE, en el año 1980 existe un parque de viviendas vacías de 100.000 unidades, mientras el parque de viviendas ocupadas en el mismo año se sitúa en el entorno de 14.680.342 unidades. La variable *forse* ha calibrado en modo de obtener el número de viviendas requeridas al terminar el periodo.

-Población y demografía

En el año 1980 se establece una cifra de población para el reino de España de 37.683.362 personas. Al terminar el ciclo, en el año 2009 la cifra se sitúa en 45.828.172 personas. La tasa de natalidad y mortalidad corresponden a la media del periodo, así como la cifra de inmigraciones y emigraciones.

-Tasa de aprovechamiento

Las tasas de aprovechamiento, sea para usos estructurales de madera conífera, sea para otros usos, se han considerado según el periodo, a razón de:

29% para el periodo comprendido entre 1980-1996

60% para el periodo comprendido entre 1997-2005

41% para el periodo comprendido entre 2006-2009

Sumando estas tres tasas y dividiendo por tres periodos obtenemos una tasa de extracción del 43,33%, la cual ha de ser dividida a su vez según el uso derivado de ella en:

-Tasa de aprovechamiento para uso estructural de madera de conífera - *tap* = **0,0867**

-Tasa de aprovechamiento para resto de usos - *tap2* = **0,3467**

El resto de variables input se han dejado iguales para el sistema de validación. Se ha modificado eso sí, la estimación de la demanda de producción de obra nueva, *dpr*, para hacer frente a la ingente producción de inmuebles del periodo de valida-

ción y que el volumen de viviendas vacías no quedara por debajo de cero en ningún año. Introducidos los valores anteriores en el modelo matemático, se procede a la validación del mismo. Se expone en la tabla 44 el conjunto de valores obtenidos de la variable *mf* en comparación con los registrados en el IFN₃ (Inventario forestal nacional 3, 2005).

Tabla comparativa valores obtenidos en la validación del modelo

Año	<i>mf</i> obtenida del modelo	<i>mf</i> con datos reales
1980	501.816.386	488.114.662
1981	501.816.386	502.075.912
1982	512.321.761	517.075.912
1983	524.774.743	532.367.912
1984	536.476.535	544.743.804
1985	548.849.323	562.329.026
1986	561.150.013	577.329.713
1987	573.773.306	592.698.424
1988	586.516.121	607.348.476
1989	599.489.542	621.869.476
1990	612.639.644	635.994.476
1991	625.999.271	649.951.363
1992	639.555.745	663.707.563
1993	653.320.376	677.352.775
1994	667.291.938	690.617.975
1995	681.475.866	703.718.025
1996	695.874.168	716.174.025
1997	710.490.723	730.755.025
1998	725.328.504	745.740.025
1999	740.391.036	759.392.214
2000	755.681.631	774.287.427
2001	771.203.789	790.282.641
2002	786.960.993	806.402.644
2003	802.956.816	822.619.543
2004	819.194.862	836.515.743
2005	835.678.806	851.516.306
2006	852.412.367	867.516.168
2007	869.399.327	892.805.768
2008	886.643.523	904.677.300
2009	904.148.849	921.900.000

Tabla 44 - Comparativa valores obtenidos en la validación del modelo. Elaboración por el autor.

Asimismo, la figura 137 advierte la relación entre los diferentes valores para la misma variable, el simulado y el real.

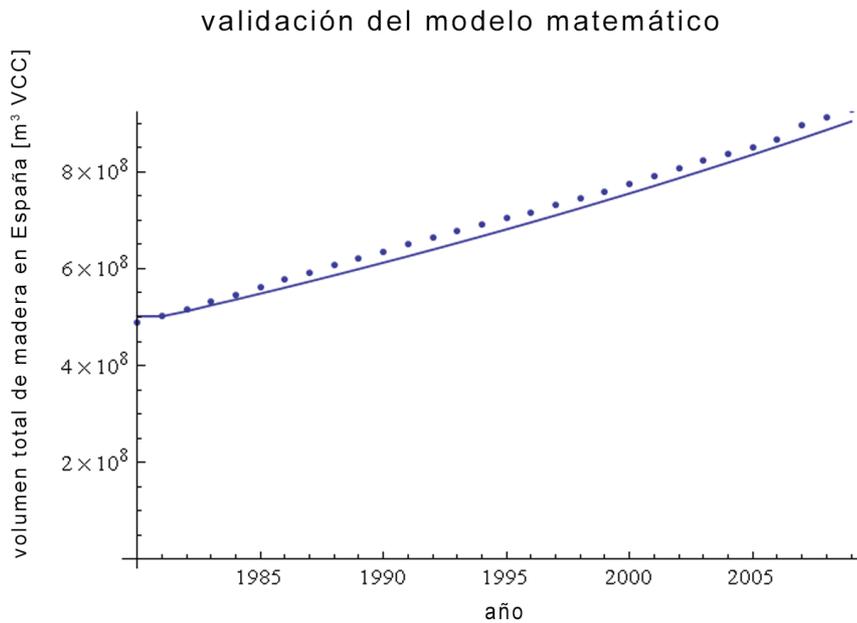


Figura 137 - Gráfica comparativa valores obtenidos en la validación del modelo. Wolfram Mathematica. Elaboración posterior realizada por el autor.

Cálculo del error relativo

De los datos muestreados anteriormente, se obtiene el correspondiente error relativo en cada periodo, según la siguiente expresión introducida en el programa de cálculo Wolfram Mathematica (Universitat Politècnica de València 2014)

```
Table[{salmt[[i,1]],100 * Abs[data[[i,2]] - salmt[[i,2]]] / data [[i,2]]},{i,1,T}] // N
```

siendo:

i, la variable que indica el valor de madera talada para cada año en cuestión
N, la variable que garantiza un valor de respuesta del programa incluido en el conjunto de los números naturales

La tabla 45 muestra los resultados del error relativo para cada año.

Tabla cálculo del error relativo en la validación del modelo.

Año	Error relativo								
1980	2,80707	1981	0,05169	1982	0,91943	1983	1,42630	1984	1,51764
1985	2,39712	1986	2,80251	1987	3,19304	1988	3,43005	1989	3,59882
1990	3,67218	1991	3,68521	1992	3,63892	1993	3,54799	1994	3,37756
1995	3,16066	1996	2,83499	1997	2,77306	1998	2,73708	1999	2,50216
2000	2,40296	2001	2,41418	2002	2,41091	2003	2,39026	2004	2,07060
2005	1,85992	2006	1,74104	2007	2,94779	2008	2,85246	2009	2,54510

Tabla 45 - Cálculo del error relativo en la validación del modelo. Elaboración realizada por el autor.

Cálculo del coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación se ha calculado según las siguientes expresiones, donde la variable m_{expm} establece el cálculo de la varianza de los datos experimentales, mientras la variable m_{modm} establece el cálculo de la varianza de los datos obtenidos del modelo. La variable R^2m representa la fórmula de calcular el coeficiente de determinación y revela la dependencia funcional entre los datos experimentales y el modelo matemático.

$$m_{expm} = \text{Sum} [data[[i,2]], \{i,2,T\}] / (T-1) // N$$

$$m_{modm} = \text{Sum} [salmt[[i,2]], \{i,2,T\}] / (T-1)$$

$$R^2m = \text{Sum} [salmt[[i,2]] - m_{modm}) * (data[[i,2]] - m_{expm}), \{i,2,T\}]^2 / (\text{Sum} [salmt[[i,2]] - m_{modm})^2, \{i,2,T\}] * (\text{Sum} [data[[i,2]] - m_{expm})^2, \{i,2,T\}])$$

El coeficiente de determinación con un valor de 0,998179, muy cercano a 1, prueba la validación del modelo.



6.4. Diseño de experimentos.



Para el diseño de los experimentos se han escogido como variables de escenario la tasa de derrocamiento de vivienda y la tasa de crecimiento natural, por ser extremadamente sensibles en el modelo generado.

La variable de control, si bien se expresa mediante las variables *tap* y *tap2*, se entiende como una sola por venir relacionadas entre ambas.

Variables de escenario

- Tasa de derrocamiento de viviendas - *tdd*
- Tasa de crecimiento natural - *tcn*

Variables de control

- Tasa de aprovechamiento madera para construcción - *tap*
- Tasa de aprovechamiento madera otros usos - *tap2*

Objetivo

Que la madera transformada para edificación, *mte*, sea en cualquier caso superior a cero.

Como posibles escenarios se sitúan la combinación de una producción natural pobre en recursos o habitual en el último decenio, junto con una tasa de derrocamiento estable o moderadamente alta producida por un posible incremento en la actividad demolidora de edificios en estado ruinoso.

Escenarios

E1: Bajo derrocamiento de vivienda $tdd=0,000758$
Crecimiento natural en bosques moderado $tcn=0,0325$

E2: Bajo derrocamiento de vivienda $tdd=0,000758$
Menor crecimiento natural en los bosques $tcn=0,01625$

E3: Alto derrocamiento de vivienda $tdd=0,001137$
Crecimiento natural en bosques moderado $tcn=0,0325$

E4: Alto derrocamiento de vivienda $tdd=0,001137$
Menor crecimiento natural en los bosques $tcn=0,01625$

En cambio, las dos estrategias estudiadas pasan por una tasa de extracción actual, con carencias en el sector debiendo realizar importaciones de madera, con una tasa de extracción mayor, del 70%, que cubra las necesidades del sector maderero completo.

Estrategias

S1: Aprovechamiento actual en España de la madera talada,

$$tap = 0,0724 \text{ y } tap2 = 0,3414$$

S2: Aprovechamiento de la madera talada para satisfacer las necesidades del sector madera y papel, 70% del total producido,

$$tap = 0.1225 \text{ y } tap2 = 0.5774$$





6.5. Discusión de resultados



Previamente a la exposición de los resultados, mencionar que las variables *pop* y *poba* no han sufrido ninguna modificación en todas las simulaciones debido a que la generación de escenarios no prevé la modificación demográfica en previsión. Se corresponden plenamente con las previsiones del INE al respecto de evolución de la población.

Dicho esto, se exponen a continuación en la figura 138 los resultados de la variable *mte*, como variable objetivo en la investigación.

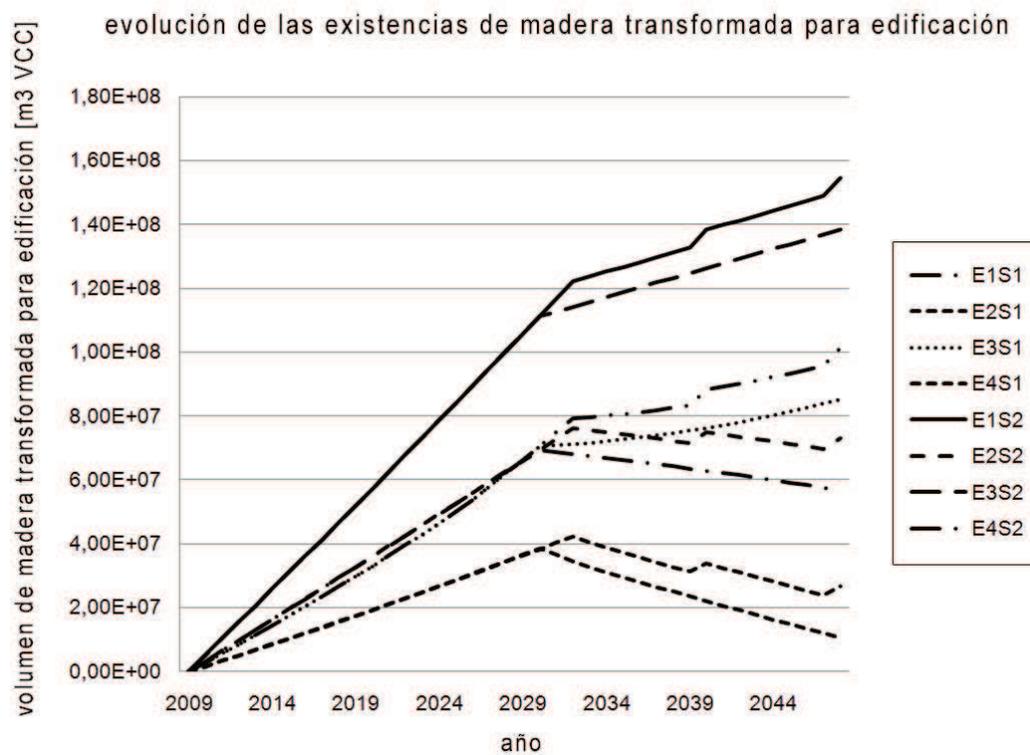


Figura 138 - Modelo de evolución de las existencias de madera transformada para edificación para los distintos experimentos. Elaboración realizada por el autor.

En el escenario 1, el más probable, incrementar la corta en un 70% aumenta la madera transformada en un 52% mientras que el volumen de producción natural se queda en un escaso 19% con respecto a la estrategia 1.

En el escenario 2 resulta insostenible la estrategia 1 ya que obligaría a un almacenamiento durante 40 años de la madera transformada para edificación, plazo total-

mente fuera de orden para los plazos examinados. Con la mitad de producción de madera transformada que el escenario E1-S1 se consigue un 60% de producción natural en los bosques. (fig. 139)

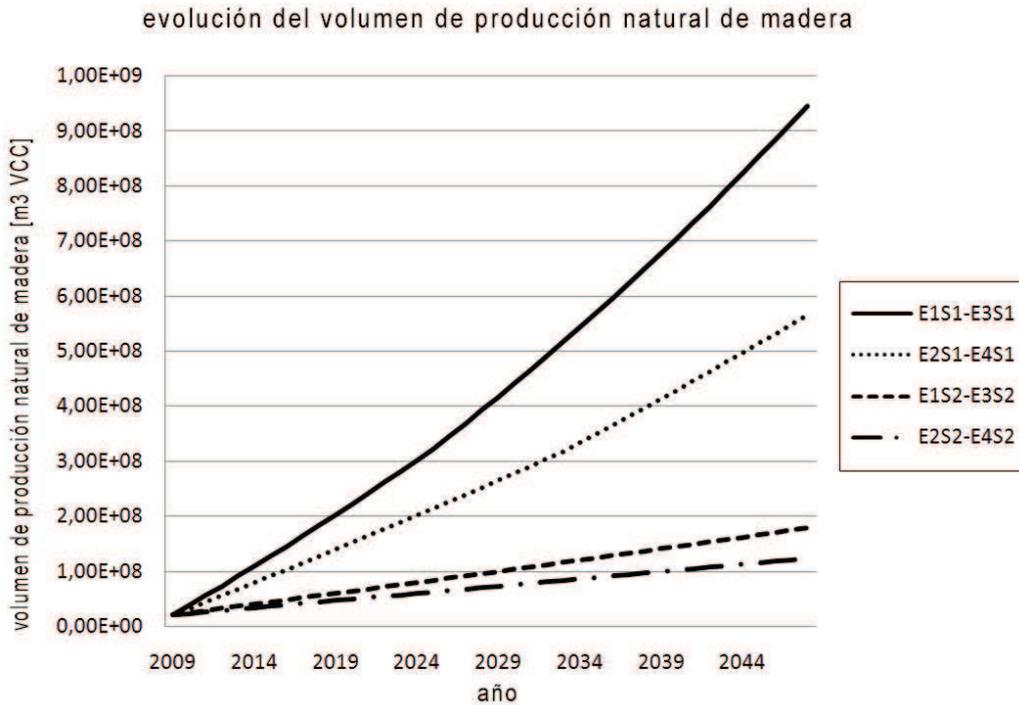


Figura 139 - Modelo de evolución de la producción natural de madera para los distintos experimentos
Elaboración realizada por el autor.

Una corta de madera superior, presente en la estrategia 2, supondría convertir el modelo en sostenible, con un volumen equivalente al 50% de E1-S2. Sorprende que teniendo una tasa equivalente a la mitad del crecimiento natural que el experimento citado, se consiguen generar 124 millones de m³VCC de producción natural de madera, un 69% de dicho experimento. Resulta importante decir que este modelo requeriría la toma de determinadas decisiones respecto al almacenamiento de madera para varios años debido al retardo en el uso de la madera transformada para edificación por la demanda asimétrica del sector.

Los escenarios 3 y 4 plantean en ambos casos recuperaciones del sector inmobiliario en el entorno de 24 años hasta alcanzar el stock máximo fijado en 500.000 viviendas debido al fuerte incremento en el derrocamiento de vivienda de un 50% que influye

en la demanda automática de vivienda. (fig. 140)



Figura 140 - Modelo de evolución del número de viviendas vacías para los distintos experimentos.
Elaboración realizada por el autor.

En el escenario 3, el efecto de esta demanda reduce en un 18% y 11% respectivamente el stock de madera transformada para edificación. Las diferentes estrategias marcan una producción natural de 945 millones de m³VCC y 179 millones de m³VCC respectivamente, diferencia enorme también registrada entre E1-S1 y E1-S2.

El escenario 4 será el más desfavorable para el establecimiento de los objetivos del modelo ya que combina un alto derrocamiento de vivienda con un menor crecimiento natural. A pesar de ello, el establecimiento de la estrategia 2 permitiría la sostenibilidad en la variable madera transformada, quizás con su valor más bajo de todo el conjunto con 56,87 millones de m³VCC.

Del mismo modo que en el experimento E2-S2 sería conveniente adoptar medidas

para la conservación de la madera transformada dado que a partir de 2018 iniciamos un ciclo, que si bien es sostenible en su esencia, peligra por el estado de conservación de la madera anteriormente talada.

La madera transformada para el resto del sector, m_2 , como se observa en la figura 141, tendría una producción sostenible siempre y cuando la producción natural se sitúe en los escenarios 1 y 3, y siempre por supuesto, bajo la estrategia 2, que plantea una tasa de extracción del 70%. Los escenarios 2 y 4 serían insostenibles.

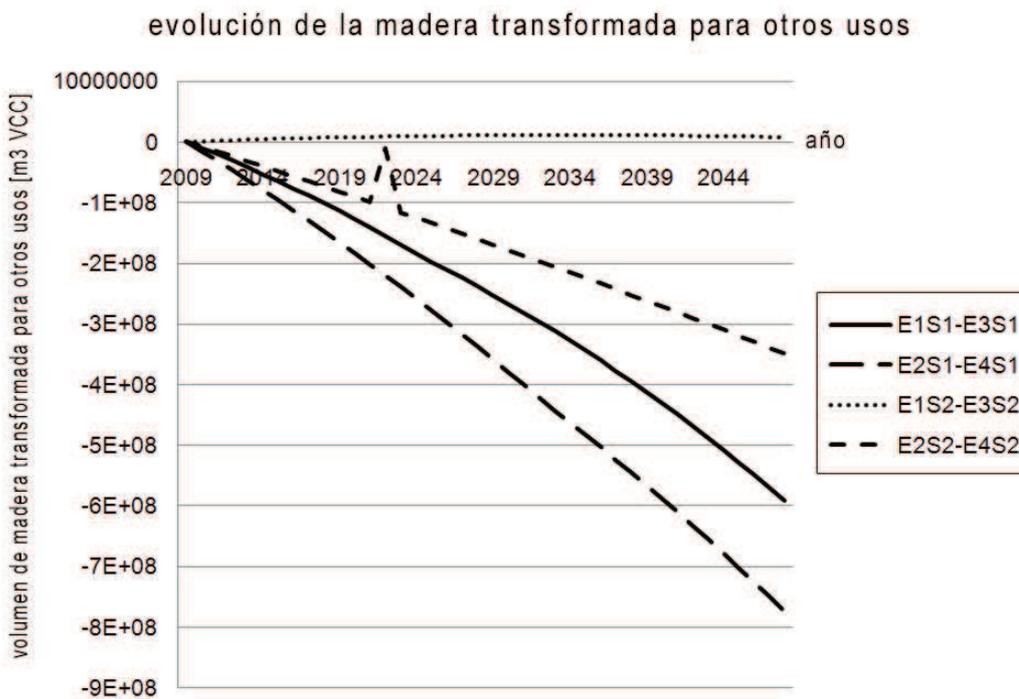


Figura 141 - Modelo de evolución del número de viviendas vacías para los distintos experimentos.

Elaboración realizada por el autor.





7. CONCLUSIONES



El desarrollo de la presente tesis doctoral, ha permitido dar respuesta a la hipótesis planteada en el primer apartado de la misma, argumentando cada uno de los aspectos evaluados, en el presente breve resumen, concluyendo a su finalización con las respuestas más relevantes.

-¿Por qué la madera contralaminada?

Una pregunta tan amplia y tan concreta a la vez, ha precisado de una demostración evolutiva, que se ha desarrollado en diversas fases bien diferenciadas.

La primera parte introductoria ha permitido desmitificar el sistema estructural porticado, basado en apoyos puntuales, como mecanismo proyectual principal para afrontar la concepción estructural de un edificio. Concebir efectivamente el pilar como una gran caja estructural, y a su vez, dicha caja como un gran pilar, permite introducir al proyectista un nuevo modo de componer, sin renunciar a la libertad compositiva necesaria para afrontar los programas y necesidades de la arquitectura actual.

Liberar la planta y la sección de ataduras, no corresponde a la elección de un sistema estructural u otro, sino a la concepción del edificio por quien lo proyecta. Los ejemplos ilustrados demuestran una gran riqueza espacial utilizando la segunda dimensión arquitectónica como eje principal compositivo.

Realizada pues esta primera verificación sobre su aplicación en la arquitectura que la sociedad de hoy demanda, un estudio detallado de su comportamiento estructural ha permitido, mediante la aplicación de los elementos finitos, desarrollar una implementación del programa ANGLE, cuyo valor científico está ampliamente demostrado. Dicha implementación ha permitido **validar un modelo virtual que refleja fielmente el comportamiento en régimen elástico del material.**

La comparación de los resultados del modelo generado, respecto de una simulada configuración interna isótropa del material, han producido una decremento en el segundo caso de las deformaciones en un 3,5%, bajo las tres hipótesis de apoyo en uno de los extremos en el caso de la flexión simple, debido a que las fibras intermedias apenas tienen sollicitación. En el caso del ensayo a compresión existe un coeficiente de variación mayor debido a las características de la muestra empleada.

El modelo simulado compuesto por elementos finitos tridimensionales, ha de-

mostrado tener un comportamiento similar al sistema de placa implementado, con valores de deformación dentro del espectro del campo muestral experimental, mas amplios que el sistemas de placa en una proporción del 8,9%. En el caso de la compresión la dispersión de resultados es menor, debido a una mayor adaptabilidad de este modelo respecto del de placa.

Los graficos comparativos resumen claramente la validación del modelo en régimen elástico.

Validado el modelo matemático que define el comportamiento del material, inicia la siguiente hipótesis:

-¿Qué sistema estructural resulta más eficiente?

La eficiencia, como objetivo necesario en cualquier proceso de toma de decisiones, toma un valor clave cuando hablamos de una cuestión tan importante como lo es la sostenibilidad del planeta Tierra. Concienciado el autor con este hecho, se ha tratado de fundamentar bajo dos categorías de impacto, energía primaria y potencial de calentamiento global, cual de los tres sistemas estructurales es mas eficiente, comparando la madera contralaminada con el hormigón armado y el acero estructural.

Partiendo de que los tres sistemas comparados son eficaces, en el sentido que consiguen resistir y deformarse en proporción normalizada, la tesis trata de definir cuál lo hace en el modo más eficiente. Para ello se han tomado dos muestras, una vivienda unifamiliar y un edificio de viviendas entre medianeras.

Los resultados demuestran una **mayor eficiencia de la madera contralaminada en las dos categorías de impacto estudiadas.**

En la categoría de impacto energía primaria, la madera contralaminada es el sistema constructivo que menor cantidad de energía demanda para la construcción de la vivienda unifamiliar, respecto de los sistemas en hormigón armado y acero estructural, con un **ahorro del 30% y del 60%** respectivamente, siendo el acero estructural el mas penalizado.

Para el caso del edificio de viviendas entre medianeras, continua siendo el sistema en madera contralaminada el menor demandante de energía, con un **ahorro del**

24% en el caso de hormigón armado y del 70% en el caso de acero estructural. En materia de **masa introducida al terreno**, en el caso de la vivienda unifamiliar, **la madera contralaminada ofrece una reducción en la masa de la estructura y cerramientos de un 63% en su comparativa con el acero estructural, siendo el hormigón armado en este aspecto el que mayor masa introduce, y el ahorro se traduce en un 72% en masa.** Para el caso del edificio de viviendas entre medianeras los valores son similares. La madera contralaminada es la que menor masa demanda en los dos casos.

Al margen de la comparativa entre sistemas, el estudio energético ha permitido observar la importancia del **periodo de construcción** en el global de energía primaria, representando en el caso de la **vivienda unifamiliar entre un 24% y un 25%** para la madera contralaminada y hormigón armado, mientras que la construcción en acero estructural supone un 42% del total.

En el caso del **edificio de viviendas** la situación se agrava para el **acero, representando únicamente la construcción, el 60% del total y superando incluso al periodo de utilización.** En cambio, para esta muestra de edificio, el periodo de construcción en **madera contralaminada y hormigón representa un 35% y 37% respectivamente.**

Este incremento en el porcentaje de la energía primaria de construcción se debe a la propia tipología del edificio, donde existe en el caso del edificio de viviendas una gran cantidad de cerramiento en relación a su superficie, con un coeficiente de compacidad menor que la vivienda unifamiliar.

Otro resultado que resulta no menos importante son los valores absolutos de los diferentes tipos de energía dependiendo del periodo de evaluación. De este modo, **para la vivienda unifamiliar, la misma energía que la vivienda consumirá durante los cincuenta años de vida útil en madera contralaminada, es la misma que se requiere para la construcción de estructura y cerramientos en acero estructural.**

Esta situación se agrava todavía mas **en el edificio de viviendas, donde únicamente la construcción en acero supera la demanda de energía primaria en periodo de utilización del edificio en madera contralaminada en un 76%.**

En valores globales, incluyendo los dos periodos de evaluación objeto de estudio, **la madera contralaminada ofrece un ahorro energético del 25% y del 41% para hormigón armado y acero respectivamente**, mientras que **en el caso del edificio de viviendas, se sitúan en un 20% y un 48% respectivamente**.

En la categoría de impacto de potencial de calentamiento global, el resultado es **una reducción** que va, en la muestra de vivienda unifamiliar, **desde el 51% de ahorro en emisiones en comparación con la estructura de hormigón armado, llegando al 60% para el acero estructural**.

En el caso de la muestra del **edificio de viviendas entre medianeras, el ahorro en emisiones es mucho mayor, llegando a tasas del 97% para el hormigón armado y del 98% de ahorro en comparación con la estructura de acero estructural**.

Este ultimo conjunto de resultados resultan realmente reveladores, ya que, si un ahorro en la huella de carbono, para viviendas unifamiliares, de entre el 50-60% supone un gran avance en materia de emisiones, en el caso de edificios de viviendas, donde el sistema estructural en madera contralaminada es masivo y tiene una presencia mayor. Considerando este aspecto, junto con el efecto sumidero de la madera, generan un beneficio en huella de carbono que **prácticamente anula el resto de emisiones globales generadas por el edificio**.

Demostrada la mayor eficiencia del sistema respecto de los dos sistemas convencionales de estructuras de edificación, la tercera y última hipótesis que se hace el autor de la presente tesis doctoral es la siguiente:

-¿Será sostenible la producción de madera de los bosques españoles en los próximos 40 años para absorber la demanda de un completo sector edificación?

Para dar respuesta a una hipótesis tan compleja ha sido necesario abandonar modelos determinísticos y generar un **modelo matemático de seis niveles** mediante iteraciones del sistema para el periodo de cálculo. Para justificar la viabilidad de la propuesta, ha sido necesario demostrar la sostenibilidad en el uso de la madera como material masivo de construcción, tanto para la estructura como para el cerramiento de los edificios.

Se han propuesto diferentes escenarios y estrategias, tomando como variables clave del proceso el **crecimiento natural de los bosques, y la tasa de derrocamiento de vivienda**. Por otro lado, la **tasa de extracción ha sido la variable de estrategia** utilizada, para mantener la sostenibilidad de los sectores edificación y maderero.

El resultado de dicha investigación se halla ya plenamente absorbido por la comunidad científica a través de su publicación en 2014 (Fernández et al. 2014). **Bajo la óptica de los diferentes escenarios propuestos**, tan solo uno de ellos genera un stock negativo de madera transformada para edificación, siendo **el mas probable, con una probabilidad mayor al 76%, plenamente sostenible**.

Por otro lado y no menos importante, **los resultados del modelo elevan las existencias de la masa arbórea en los bosques españoles, en todos los escenarios posibles**, con desarrollos en el tiempo lineales o exponenciales dependiendo del escenario. **En cambio, la evolución de madera transformada para otros usos, es sostenible únicamente en un 25% de los escenarios posibles**.

Se ha practicado la simulación con periodo de valoración de 400 años, confirmando los mismos valores obtenidos a 40 años del estudio.

Demostrada pues, la viabilidad productiva en los próximos años, debido a varios factores como la inversión de la pirámide poblacional con crecimientos vegetativos negativos a partir de 2019, el elevado stock de viviendas, el descenso en el saldo migratorio, y un crecimiento de masa forestal, especialmente de bosque alto, podemos garantizar que mediante la explotación pública y privada actual de los bosques españoles, **no sólo es posible fomentar la sostenibilidad energética y en emisiones, sino a su vez, proveer una actividad generadora de riqueza en el contexto de la actual crisis económica**.

Sería imperdonable que el transcurso de la presente crisis económica no diera como fruto un nuevo modo de construir. El sistema estructural en madera contralaminada no supone de ningún modo la panacea ante el tan castigado sector construcción, pero sí que informa sobre un nuevo modo de concebirlo, disminuyendo la energía necesaria en términos de inversión metabólica y contribuyendo a que este planeta sea un lugar más sostenible mejorando un sector que representa un porcentaje tan elevado de las emisiones totales de CO₂ al ambiente.

Resumiendo el conjunto de reflexiones anteriores se pueden afirmar las siguientes **conclusiones finales**:

1_ Se ha validado un modelo de elementos finitos bidimensionales que simulan la ortotropía y constitución interna de la madera contralaminada y su comportamiento en régimen elástico.

2_ La comparación de dicho modelo bidimensional con un modelo tridimensional de elementos finitos ha dado como resultado un comportamiento similar de los dos modelos, con valores de deformación un 9,8% mas amplios en el último caso.

3_ En las dos categorías de impacto estudiadas se ha demostrado una mayor eficiencia de la madera contralaminada respecto de los sistemas convencionales con estructura de hormigón armado y acero estructural.

4_ La demanda de **energía primaria** que genera estructura y cerramientos con madera contralaminada en los periodos de construcción y utilización del edificio, produce un ahorro de entre el 20% y el 48%, siendo el acero estructural el mas penalizado en esta categoría, llegando únicamente la construcción de cerramientos y estructura en este sistema a equivaler la energía primaria demandada por el edificio construido en madera contralaminada durante los cincuenta años de vida útil del mismo.

5_ Únicamente el periodo de construcción, representa entre el 24% y el 35% dependiendo de la muestra utilizada, del total de energía demandada, en el caso de la madera contralaminada. Para el caso del hormigón se eleva al 25% y 37% respectivamente, siendo el acero estructural quien mayor energía demanda para la construcción, representando este periodo entre un 42% llegando hasta el 60% para la muestra de edificio de viviendas.

6_ Respecto del **potencial de calentamiento global**, cabe diferenciar claramente el ahorro que produce la utilización de madera contralaminada en las dos muestras utilizadas. Así, en el caso de la vivienda unifamiliar el ahorro en emisiones va del 51% al 60%, para hormigón armado y acero estructural respectivamente. En el caso del edificio de viviendas el ahorro llega hasta valores del 97% y 98% en emisiones. Este aspecto resulta realmente revelador, ya que podemos afirmar que utilizar madera contralaminada en edificios de viviendas anula el conjunto de emisiones globales de CO₂.

7_ Demostrada su mayor eficiencia energética y en emisiones, el último aspecto relevante resulta mediante la demostración de la **sostenibilidad en la explotación de los bosques españoles, y su capacidad para extraer madera de conífera suficiente para absorber todo un sector edificación**. El modelo matemático generado, el cual cuenta con un elevado conjunto de variables estudiadas genera, para la mayoría de escenarios propuestos, incluido el más probable, un stock positivo de madera transformada para edificación.

8_ El citado modelo matemático preve un incremento de las existencias arbóreas de los bosques españoles, a pesar de dar servicio a todo el sector construcción, con desarrollos lineales o exponenciales, dependiendo del escenario propuesto. Esto permite desmitificar un tema tan sensible como lo es la desertificación, **permitiendo no sólo fomentar la sostenibilidad energética y en emisiones, sino a su vez, proveer una actividad generadora de riqueza**.



Il completo sviluppo di questa tesi dottorale ha permesso di rispondere all'ipotesi introdotta nel primo item di essa, sostenendo ciascuno degli aspetti valutati.

- ¿Perché il legno contralamellare?

Una domanda così ampia e specifica allo stesso tempo, ha messo in moto un discorso evolutivo, che è stato sviluppato in diverse fasi differenziate.

La prima parte introduttiva, ha permesso di smitizzare il sistema strutturale, prevalentemente utilizzato, basato su appoggi puntuali, come il meccanismo principale del progetto per affrontare la progettazione strutturale di un edificio. Concepire, di fatto, il pilastro come una scatola e, a sua volta, essa scatola come un gran pilastro, permette al progettista di introdurre un nuovo modo di comporre, senza rinunciare alla libertà compositiva necessaria per soddisfare le esigenze dei programmi e dell'architettura contemporanea.

Liberare la pianta e la sezione, non corrisponde all'elezione di un sistema strutturale o di un altro, se non alla concezione dell'edificio per chi lo progetta. Gli esempi illustrati mostrano una grande ricchezza spaziale utilizzando la seconda dimensione architettonica come asse compositivo principale.

Realizzata questa prima verifica sull'applicazione nell'architettura che la società di oggi richiede, uno studio dettagliato del comportamento strutturale ha permesso, mediante l'applicazione degli elementi finiti, di sviluppare una implementazione del programma ANGLE, il cui valore scientifico è ampiamente dimostrato. Questa implementazione ha permesso di **validare un modello virtuale che rispecchi fedelmente il comportamento in regime elastico del materiale.**

Confrontando i risultati del modello generato, con riguardo ad una simulata configurazione interna come materiale isotropo, hanno prodotto una diminuzione, nel secondo caso, delle deformazioni di un 3,5%, sotto le tre ipotesi di appoggio in uno dei due stremi nel caso di flessione semplice, dovuto a che le fibre intermedie del legno appena hanno sollecitazione. Per la prova di compressione esiste un elevato coefficiente di variazione dovuto alle caratteristiche del campione utilizzato.

Il modello simulato composto per elementi finiti tridimensionali, ha dimostrato avere un comportamento simile al sistema bidimensionale implementato, con valori di de-

formazione all'interno dello spettro dei valori sperimentali, essendo più ampi rispetto ai sistemi bidimensionali, in una proporzione di 8,9%. Nel caso dei risultati della prova a compressione la dispersione dei risultati è inferiore, a causa di una maggiore adattabilità di questo modello rispetto agli elementi bidimensionali.

I grafici comparativi rendono chiaramente la convalidazione del modello in regime elastico.

Convalidato il modello matematico che definisce il comportamento del materiale, si è lavorato sulla seguente ipotesi:

- ¿Quale sistema strutturale è più efficiente?

L'efficienza, come obiettivo necessario di ogni processo decisionale, prende un valore chiave quando si parla di una questione così importante come lo è la sostenibilità del pianeta Terra. L'autore, cosciente di questo fatto, ha cercato di verificare in due categorie d'impatto, energia primaria e potenziale di riscaldamento globale, quale dei tre sistemi strutturali è più efficiente, comparando il legno controlamellare con il calcestruzzo armato e acciaio strutturale.

Partendo dall'ipotesi che i tre sistemi confrontati sono efficaci, nel senso che deformano e resistono in proporzione normalizzata, la presente tesi di ricerca cerca di definire quale lo fa nel modo più efficiente. A questo scopo sono stati presi due campioni, un alloggio unifamiliare e un edificio con più alloggi.

I risultati mostrano **una maggiore efficienza del XLAM nelle due categorie d'impatto studiate.**

Nella categoria d'impatto di **energia primaria**, il sistema di costruzione in **XLAM richiede il minimo fabbisogno energetico** per la costruzione dell'alloggio unifamiliare, in confronto coi sistemi di calcestruzzo armato e acciaio strutturale, **con un risparmio del 30% e il 60% rispettivamente**, essendo l'acciaio strutturale il più penalizzato.

Nel caso dell'edificio con più alloggi, rimane l'XLAM col minore fabbisogno energetico, con un **risparmio del 24% rispetto l'uso del calcestruzzo armato e del 70% rispetto l'uso dell'acciaio strutturale.**

In termini di **massa introdotta sul terreno**, nel caso dell'alloggio unifamiliare, **il legno controlamellare offre una riduzione della massa della struttura ed involucro di un 63% rispetto all'acciaio strutturale e di un 72% di risparmio** in massa rispetto al calcestruzzo armato. Nel caso dell'edificio con più alloggi, i valori sono simili. L'XLAM è quello che ha un minore apporto di massa nei due casi esaminati.

A parte il confronto tra i sistemi, lo studio energetico ha permesso di osservare l'importanza del **periodo di costruzione**, nel globale dell'energia primaria, rappresentando nel caso **dell'alloggio unifamiliare tra il 24% e il 25% per il legno controlamellare e calcestruzzo armato**, mentre la costruzione di strutture **in acciaio strutturale rappresenta il 42% del totale**.

Nel caso dell'edificio con più alloggi, la situazione peggiora per **l'acciaio strutturale, rappresentando la costruzione soltanto, il 60% del totale, superando anche il periodo di utilizzo**. Invece, per questo tipo di edificio, il sistema in calcestruzzo e XLAM rappresenta il 35% e il 37% rispettivamente.

Questo aumento della percentuale di energia primaria di costruzione è dovuto alla propria tipologia dell'edificio, dove esiste nel caso dell'edificio con più alloggi una grande quantità d'involucro in rapporto alla superficie, con un coefficiente di compattezza minore dall'alloggio unifamiliare.

Un altro risultato non meno importante, sono i valori assoluti dei diversi tipi di energia a seconda del periodo di valutazione. Così, **per l'alloggio unifamiliare, l'energia che consumerà durante i cinquanta anni di vita con struttura XLAM, è la stessa che viene richiesta per la costruzione di strutture e involucro in acciaio strutturale**.

Questa situazione è aggravata ancora di più nel dell'edificio con più alloggi in cui **solo la costruzione d'acciaio supera il fabbisogno di energia primaria nel periodo di utilizzo di edificio in XLAM di un 76%**.

In valori globali, tra cui entrambi i periodi di valutazione in fase di studio, **l'XLAM offre un risparmio energetico del 25% e 41% rispettivamente in confronto al calcestruzzo armato e acciaio strutturale**, mentre nel caso dell'edificio con più alloggi, si trovano sul 20 % e 48% rispettivamente.

Nella categoria d'impatto di **potenziale del riscaldamento globale**, il risultato è **una**

riduzione significativa, nel caso dell'alloggio unifamiliare, **con risparmi del 51% in emissioni CO₂ rispetto alla struttura in calcestruzzo armato, raggiungendo il 60% rispetto l'acciaio strutturale.**

Per l'edificio con più alloggi, il risparmio di emissioni CO₂ è molto più elevato, raggiungendo risparmi del 97% rispetto il calcestruzzo armato e dal 98% rispetto alla struttura in acciaio strutturale.

Quest'ultima serie di risultati sono davvero significativi, perché se il risparmio di emissioni di CO₂, per alloggi unifamiliari, è del 50-60%, è un passo avanti in termini di emissioni, nel caso di edifici con più alloggi, dove il sistema strutturale di legno controlamellare è masivo e ha una maggiore presenza. Considerando questo aspetto, insieme all'effetto di sequestro di carbonio fatto dal legno, si genera **un beneficio nell'impronta di carbonio il quale praticamente annulla le altre emissioni globali dall'edificio.**

Dimostrata la maggiore efficienza del sistema in confronto ai due sistemi convenzionali di strutture edilizie, la terza ed ultima ipotesi che si fa l'autore di questa tesi è la seguente:

- ¿Sarà la produzione di legno sostenibile delle foreste spagnole nei prossimi 40 anni per assorbire la domanda del completo settore edilizio?

Per rispondere a un'ipotesi così complessa è stato necessario abbandonare modelli deterministici e generare un **modello matematico di sei livelli** attraverso iterazioni del sistema per il periodo di calcolo. Per giustificare la fattibilità della proposta, è stato necessario dimostrare la sostenibilità nell'uso del legno come materiale massivo di costruzione, sia per la struttura e per l'involucro degli edifici.

Sono stati proposti diversi scenari e strategie, prendendo come variabili chiave del processo **la crescita naturali delle foreste, e il tasso di demolizione di alloggi. Inoltre, il tasso di estrazione è stata la variabile di strategia** utilizzata per mantenere la sostenibilità dei settori dell'edilizia e del legno.

Il risultato di questa ricerca è già completamente assorbito dalla comunità scientifica attraverso la già citata pubblicazione nel 2014 (Fernandez et al. 2014). **Dal punto di vista dei diversi scenari proposti**, solo uno di loro genera uno stock negativo di leg-

no trasformato per edilizia, essendo **il più probabile, con una probabilità maggiore al 76%, completamente sostenibile.**

Inoltre, e non meno importante, **i risultati del modello sollevano lo stock di massa boscosa nelle foreste spagnole, in tutti gli scenari possibili,** con gli sviluppi nel tempo lineari o esponenziali a seconda dello scenario.

Tuttavia, l'evoluzione del legno trasformato per altri usi, è sostenibile solo nel 25% dei possibili scenari.

La simulazione è stata praticata con periodo di misurazione di 400 anni, confermando gli stessi valori ottenuti nello studio a 40 anni.

Dimostrata allora, la fattibilità produttiva nei prossimi anni a causa di diversi fattori, come l'inversione della piramide della popolazione dal 2019, la crescita vegetativa negativa, l'elevato stock di alloggi, il calo del saldo migratorio, e la crescita boscosa soprattutto fustaia, possiamo garantire che l'attuale operazione pubblica e privata dei boschi spagnoli, non solo possono promuovere la sostenibilità energetica ed emissioni, ma a sua volta, di fornire un'attività che genera ricchezza nel contesto dell'attuale crisi economica.

Sarebbe imperdonabile che durante l'attuale crisi economica non si pensasse ad un nuovo modo di costruire. Il sistema strutturale in legno controlamellare non deve diventare in alcun modo la panacea per un settore edilizio così punito, ma può essere un nuovo modo di concepirlo, riducendo l'energia necessaria in termini d'investimento metabolico e contribuire affinché questo mondo sia un luogo più sostenibile, migliorando un settore che rappresenta una percentuale molto alta delle emissioni totali di CO₂ all'ambiente.

Riassumendo tutte le riflessioni anteriori si possono affermare le seguenti **conclusioni finali**:

1_ È stato convalidato un modello ad elementi finiti bidimensionali che simulano l'orthotropia e costituzione interna del XLAM e il suo comportamento in regime elastico.

2_ Il confronto del modello bidimensionale con un modello ad elementi finiti tridimensionali ha determinato un comportamento simile dei due modelli, con valori di 9,8% di deformazione più ampia nell'ultimo caso.

3_ Nelle due categorie d'impatto studiate, ha mostrato una maggiore efficienza l'XLAM rispetto ai sistemi convenzionali con struttura in calcestruzzo armato e acciaio strutturale.

4_ Il fabbisogno di **energia primaria** che genera la struttura e involucro in XLAM, nei periodi di costruzione e uso dell'edificio, producendo un risparmio tra il 20% e il 48%, essendo l'acciaio strutturale il sistema più penalizzato in questa categoria, raggiungendo solo la costruzione d'involucro ed struttura in questo sistema, l'equivalente al fabbisogno di energia primaria dell'edificio costruito in legno controlamellare durante i cinquanta anni di vita utile.

5_ Solo il periodo di costruzione, rappresenta tra il 24% e il 35% a seconda del campione utilizzato, la domanda totale di energia, nel caso del legno controlamellare. Nel caso del calcestruzzo risale rispettivamente al 25% e 37%, essendo l'acciaio strutturale quello che aumenta il fabbisogno energetico per l'edilizia, rappresentando il periodo tra il 42%, e arrivando al 60% per il campione di edificio residenziale.

6_ Per quanto riguarda il **potenziale di riscaldamento globale**, si dovrebbe chiaramente differenziare i risparmi derivati dall'uso del XLAM utilizzato nei due campioni. Così, nel caso dell'alloggio unifamiliare le riduzioni delle emissioni vanno dal 51% fino al 60%, con riguardo al calcestruzzo armato e acciaio strutturale rispettivamente. Nel caso dell'edificio condominiale, raggiunge valori di risparmio del 97% e 98% delle emissioni. Questo aspetto è davvero rivelatore, e possiamo dire che l'uso del XLAM negli edifici residenziali sostituisce praticamente l'insieme delle emissioni globali di CO₂.

7_ Dimostrata l'efficienza energetica e nelle emissioni, l'ultimo aspetto rilevante è la dimostrazione della **sostenibilità nello sfruttamento delle foreste spagnole e la loro capacità di estrarre sufficiente legno di conifera ad assorbire un intero settore edilizio**. Il modello matematico generato, che ha un grande insieme di variabili studiate genera, per la maggioranza degli scenari, addirittura il più probabile, uno stock positivo di legno trasformato per l'edilizia.

8_ Il citato modello matematico prevede un aumento della massa boscosa nei boschi spagnoli, benché diano servizio a tutto il settore edilizio, con sviluppi lineari o esponenziali, a seconda dello scenario proposto. Questo permette screditare un argomento così delicato come è la desertificazione, e che ne consente **non solo di promuovere la sostenibilità energetica ed in emissioni, ma a sua volta, fornisce un'attività generatrice di ricchezza**.



8. INVESTIGACIÓN ULTERIOR



Son algunas las cuestiones que surgen una vez concluida una investigación realizada en la presente tesis doctoral. Se puede decir que cada apartado genera una pregunta ulterior, que debe ser objeto de investigaciones futuras.

_ De este modo, la aplicación tipológica del sistema en modelos de vivienda, mediante el estudio de la capacidad del material para modularse y multiplicarse, y su comparativa con sistemas porticados, puede desvelar un nuevo procedimiento compositivo en el proyecto de edificios.

_ El aspecto donde mayormente procede un estudio ulterior es seguramente el análisis dinámico del modelo, mediante su comparación con los ensayos experimentales incluidos en el proyecto SOFIE. La modificación de las condiciones de contorno de las láminas para ajustar los valores de deformación, es un objetivo inmediato de la investigación.

_ Otro aspecto relacionado con el anterior, consiste en conocer el comportamiento no lineal del material, mediante la aplicación de criterios de rotura y comprobación de tensiones para verificar el fallo del material y poder evaluarlo con mayor rigor.

_ La durabilidad de las colas empleadas para la construcción de la madera contralaminada está garantizada por 10 años, ya que la normativa actual no preve plazos mayores. Es lógico pensar que la transferencia de esfuerzo rasante entre las láminas depende exclusivamente de dicha cola. Actualmente se busca, en diversas investigaciones ya iniciadas, la durabilidad de dichas colas. Debe ser un objetivo consolidar una normativa que permita aumentar esa garantía.

_ Analizar mas tipologías edificatorias, incluir edificios terciarios, incluir el restante periodo del ciclo de vida del edificio, y dibujar un mapa de ahorro energético del total parque inmobiliario puede ser objeto de investigación, para elaborar unas conclusiones mas rigurosas en las dos categorías de impacto evaluadas.

_ Por último, aplicar el modelo hidrodinámico a diferentes naciones para dibujar y extender la conciencia de que una explotación sostenible de los bosques puede permitir absorber la demanda total de un sector tan amplio como la construcción y reducir asimismo sus emisiones de CO₂.



9. BIBLIOGRAFÍA



Abanda F.H., Tah J.H.M., Cheung F.K.T., Mathematical modelling of embodied energy, greenhouse gases, waste, time-cost parameters of building projects: A review, *Building and Environment*, inpress, 2012.

Agarwal B.D., Broutman L.J.,(1980) *Analysis and performance of fiber composites*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York.

Al-Douri H.K.H., Hamodi.K.A.M.H., Tesis de Master, *Compression strenght perpendicular to grain in CLT*, Vaxjo University, 2009.

Alonso A. (2015). Universitat Politècnica de Valencia, ANGLE (versión 13.09.2015). Ultimo acceso 21 Septiembre 2015.

Alonso A., Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Valencia, 2003.

Anbumozhi V., Gunjima T., Prem Ananth A., Visvanathan C. (2010) An assessment of inter-firm networks in a wood biomass industrial cluster: lessons for integrated policymaking, *Clean Technologies and Environmental Policy* 12: 365-372.

Anderson, D., Holdren, J., Jefferson, M., Jochem, E., Nakicenovic, N., Reddy, A., Rogner, H., Smith, K., Turkenburg, W., & Williams, R. (2000) Informe mundial de la energía, EEUU, United Nations Development Programme.

Argüelles R., Arriaga F., Esteban M., Iñiguez G., Argüelles R., *Estructuras de madera. Diseño y cálculo*, Aitim, Madrid, 2013.

Banco de Precios BEDEC, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>. Ultimo acceso 28 de agosto de 2015.

Bare J.C., Development of impact assessment methodologies for environmental sustainability, *Clean Technologies and Environmental Policy* (2013), doi: 10.1007/s10098-013-0685-4.

Batoz J.L. & Bathe K.J., A study of thre-node triangular plate bending elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 15, 1771-1812, 1980.

Batoz J.L. & Lardeur P., A discrete shear triangular nine D.O.F. element for the analysis of thick to very thin plates, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 28, 553-560, 1989.

Batoz J.L. & Katali I., On a simple triangular Reissner-Mindlin plate element based on incompatible modes and discrete constraints, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 35, 1603-1632, 1992.

Bergan P.G., & Felippa C.A., A triangular membrane element with rotational degrees of freedom, *Comp. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol 50, 25-69, 1985.

Bozzo L.M., Análisis, diseño y optimización de placas empleando elementos finitos mixtos, Monografía CIMNE 24, Barcelona, 1994.

Blab H.J., Görlacher R., Bemessung in Holzbau-Brettsperrholz. Berechnungsgrundlagen. In *holzbaukalender*. Bruderverlog, 580-598, 2003.

Blenghini G.A., Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy, *Building and environment*, 2009;44:319-330.

Bogensperger T., Augustin M., Schickhofer G., International council for research and innovation in building and construction, 2011.

Buchanan A., Levine B., Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental science and policy*, 1999;2:427-437.

Cabezas H., Pawlowski C.W., Mayer A.L., Hoagland T. (2003) Sustainability: ecological, social, economic, technological, and systems perspectives. *Clean Technologies and Environmental Policy* 5: 167-180.

Cabrero, J.M., Gebremedhim, K.G. Elorza J. (2009). Criterios de rotura en miembros de madera. V congreso Nacional y II Congreso Ibérico AROINGENIERIA, 2009, Lugo.

Ceccotti A., New technologies for construction of medium-rise buildings in seismic regions: The xlam case, *Structures Engineering International*, 156-165 (2008).

Ceccotti A., Sandhaas C., Yasumura M., Seismic Behavior of Multistory Cross-laminated Timber Buildings, *UNECE-SWST International Convention*, 2010.

Ceccotti A., Sandhaas C., Okabe M., Yasumura M., Minowa C., Kawai N., SOFIE project – 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building, *Earthquake Engineering and structural dynamics*, issue 42, paginas 2003-2021, 2013.

CEN/TC 350 WG1 N075. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. Working draft TC 350 WI 011, 2008.

Cervera Bravo, J.: "Las estructuras y el peso propio", *Informes de la construcción*, vol. 42, nº 407(1990), pp. 73-85.

Chandrupatla, T.R., Belegundu, A.D. (1999), *Introducción al estudio del elemento finito en inge-*

nería, segunda edición, Prentice Hall, México.

Colegio de Registradores de la Propiedad, Anuario 2011 de Estadística Registral Inmobiliaria, Madrid, 2012

Comisión Europea, Communication for the commission to the council and the European Parliament on integrated product policy. Building on environmental Life-cycle thinking. Bruselas COM (2003) 302.

Cuchi A., Arquitectura. Proceedings seminario informaticas asociadas al ACV. Unviersitat autonoma de Barcelona, 18 de junio de 2008.

Cuchí A., Pagés A., Sobre una estrategia para dirigir al sector edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Ministerio de Vivienda. Madrid. Octubre 2007.

De la Riva, J.M., J.Palacios, A., Vinuesa, J., El Fenómeno de las viviendas desocupadas, Madrid, 2008.

Departamento de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno Vasco: Madera y cambio climático, Colección LUR número 14, Vitoria, 2009

Dieguez Aranda, U., Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en galicia, Galicia, 2009.

Entrevista del 15 de febrero 2011, Washington State University.

Fernández, L.: El fuego y la memoria, Madrid, Alianza Editorial, 1991.

Fernández M., Martínez A., Alonso A., Lizondo L., A mathematical model for the sustainability of the use of crosslaminated timber in the construction industry: the case of Spain, Clean Technologies and environmental policy, DOI 10.1007/s10098-014-0738-3, 2014

Fitz M., Untersuchung des Schwing verhaltens von Deckensystemen aus Brettsperrholz (BSP).

Flaig M., Blab H.J., Keilgezinkte Rahmenecken und Satteldachträger aus Brettsperrholz, Karlsruher Institut für Technologie Holzbau und Baukonstruktionen, Karlsruhe, 2015.

Gámez-García D.C., Gómez-Soberón J.M., Corral-Higuera R., Almaral-Sánchez J.L., Gómez-Soberón M.C., Gómez-Soberón L.A., LCA as comparative tool for concrete columns and glulam columns, Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, DOI:10.5755/j01.sace.11.2.10291, 2015.

Gordon, J.E.: Structures or Why things don't fall down, Madrid, Calamar Ediciones, 2004.

Goverse T., Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints resources, Conservation and recycling, 2001;34:53-74

Gerilla G.P., Teknomo K., Hokao K., An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction, Building and Environment issue 42, paginas 2778-2784, 2007.

Google Earth (2015), Version 7.1.5.1557, <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>, Ultimo acceso 15 Junio 2015.

Guggenberger W., Moosbrugger T., Mechanics of CLT under uniaxial bending, world conference of timber engineering, 2006.

Guitard, D. Mécanique du matériau bois et composites. Cépadués-Éditions. Toulouse, 1987.

Gustavson L., Joelsson A., Sathre R., Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood framed apartment building, Energy and buildings, 2010;42(2):230-242

Gustavson L., Pingoud K., Sathre R., Carbon dioxide balance of wood substitution. Comparing concrete and wood-framed buildings, Mitigation and adaptation. Strategies for global change, 2006;11:667-691

Halili Y., Tesis Doctoral, Universidad de Graz, 2008.

Hamm P., Richter A., Winter S., Floor vibrations – new results. World conference of timber engineering, 2010.

Hubermann N., Pearlmutter D., A life cycle energy analysis of building materials in the Negev desert, Energy and buildings, 2008;40:837-848

Huovila P., Ala-Juusela M., Melchert L., Pouffary S., Buildings and climate change. Status, challenges and opportunities. United Nations Environment Programme. ISBN 978-92-807-2795-1, 2007.

I.N.E., Notas de prensa, Proyección de la Población de España a Largo Plazo, 2009-2049, Madrid, enero 2010

I.N.E., Boletín informativo del Instituto Nacional de Estadística, Madrid, marzo de 2009

I.N.E., Estadísticas de construcción, Madrid, marzo de 2009

Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña, Banco de Precios BEDEC, <http://itec>.

es/nouBedec.e/bedec.aspx, ultimo acceso 22 de julio de 2015.

International building Code, <http://www.iccsafe.org/Pages/default.aspx>. Ultimo acceso 13 de agosto 2015.

Ingwersen W.W., Garmestani A. S., Gonzalez M.A., Templeton J. J., A systems perspective on responses to climate change, *Clean Technologies and Environmental Policy* (2013), doi: 10.1007/s10098-012-0577-z.

Jöbstl R.A., Praxisgerechte Bemessung von Brettspertholz. In: *Ingenieurholzbau-Karlsruher Tage*, 50-61, 2007 (Alemán).

Jönsson Å, Tools and methods for environmental assessment of building products - methodological análisis of six selected approaches, *Building and environment*, 2000; 35, 223-238.

Kasthurba A.K. & Reddy K. R., Managing Building Waste for Sustainable Urban Development: Challenges, Opportunities and Future Outlook, *Proc. International Conference on Sustainable Civil Infrastructure 2014*, Indian Institute of Technology, Hyderabad, India, 2014.

Kreuzinger H., *Platten, Scheiben und schalen- Ein Berechnungsmodell für gängige statikprogramme*, 1999.

Larsson, N.: Planificación de Urgencia para la reducción rápida de emisiones de gases de efecto invernadero, *Informes de la construcción*, vol. 62, nº 517 (2010), pp. 23-35, doi: 10.3989/ic.09.022.

Majano-Majano, A., Fernandez-Cabo, J.L., Hoheisel, S. and Kleim, M. (2012). A test method for characterizing clear Wood using a simple specimen. *Experimental Mechanics* 52:1079-1096. DOI 10.1007/s11340-011-9560-6.

Mascia N. T., Simoni R. A., Analysis of failure criteria applied to Wood, *Engineering Failure Analysis* 35, pp 703-712, Elsevier, 2013.

Mateo, J.LI., *Viviendas en el puerto de Amsterdam*, Tectonica 11, Madrid, 1999.

Mercader, M.P: Modelo de cuantificación de las emisiones de CO2 producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución, *Informes de la construcción*, vol. 64, nº 527 (2012), pp. 401-414, doi: 10.3989/ic.10.082.

Merlini, P., Basso, A., *Teoria e progetto per un nuovo sistema costruttivo in pannelli di legno, L'architettura e le sue declinazioni*, Iper testo Edizioni, Verona, 2008

Mikulits, R.: ETA-06/0138, Austria, Österreichisches Institut für Bautechnik, 2006.

Milutiene E., Staniskis J.K., Krucius A., Augulien V., ArdickasIncrease D. (2012) Increase in buildings sustainability by using renewable materials and energy, *Clean Technologies and Environmental Policy* 14: 1075-1084.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Inventario forestal nacional 3, Madrid, 2005.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Los incendios forestales en España 2009, Madrid, 2010.

Ministerio de Fomento, Código técnico de la edificación Documento Básico Seguridad Estructural, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008

Ministerio de Fomento, Estadísticas de la Construcción, Madrid, 2012.

Ministerio de Industria, energía y turismo, Factores de Emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España, 2014.

Monahan, J., Powell, J.C.: "An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework", *Energy and Buildings*, nº 43 (2011), pp. 179-188, doi:10.1016/j.enbuild.2010.09.005.

Montero G., Ruiz Peinado R., Muñoz M., Monografías INIA - Serie Forestal nº 13-2005, Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, 2005.

Montero G. & Serrada R., Situación de los bosques y del sector forestal en España, Informe 2013, S.E.C.F., Asturias, 2013.

Moosbrugger T., Tesis Doctoral, Universidad de Graz, 2008.

Nemry F., Uihlein A., Makishi C., Wittstock B., Braune A., Wetzel C., Hasan I., Niemeier S., Frech Y., KreiBig J., Gallon N., Potenciales de Mejora Medioambiental de los Edificios Residenciales (IMPRO-Building), Oficina para Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo, 2008.

Observatorio Vasco de la vivienda (O. V. V.), Panorámica de la vivienda en Europa, Servicio de Estudios, Planificación y Presupuestos, San Sebastián, 2011.

Petersen A.K. & Solberg B., Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-analysis from Norway and Sweden, *Forest Policy and Economics*, 2005;7:249-259.

Saavedra Flores E.I., Dayyani I., Ajaj R.M., Castro-Triguero R., Diaz DelaO F.A., Das R., González Soto P., Analysis of cross-laminated timber by computational homogenisation and experimental validation, *Composite Structures*, issue 121, paginas 386-394, 2015.

Salzmann C., Tesis Doctoral , Universidad de Graz, 2010.

Schickhofer G. & Thiel A., CLTdesigner – A software tool for designing cross laminated timber elements: 1D plate Design, WCTE (2010).

Schniewind A.P. , Barret J.D., (1969).

Serrano E., Tesis Doctoral , Universidad Linnaeus, 2010.

Simo, J.C., Huges T.J.R., *Computational Inelasticity*, ISBN 0-387-97520-9, 1998

Smith, A., Landis, E. and Gong, M. (2003). *Fracture and fatigue in wood*. John Wiley and Sons Ltd. England.

T.A.C.M. van der Put, Derivation of the bearing strenght perpendicular to the grain of locally loaded timber blocks, *Holz als Roh-und Werkstoff* 66, 2008.

Sartori I., Hestnes A.G., Energy use in the life cycle of conventional and low energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 2007;39:249-257.

Sikdar S.K. (2009) Quo vadis energy sustainability? *Clean Technologies and Environmental Policy* 11: 367-369.

Universitat Politècnica de València (2012). *Wolfram Mathematica* (version 8.0.1.0). Oxfordshire: Wolfram Research. www.wolfram.com/mathematica/. Ultimo acceso 28 Feb 2014.

Universitat Politècnica de València (2013). *Certificación de Eficiencia Energética de Edificios de viviendas nuevos y existentes. Método Abreviado (CERMA versión 2.6)*, <http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/Procedimientossimplificadosparaedificiosdeviviendas.aspx> - Ultimo acceso 3 Marzo 2014.

Varios autores (2012) *Policies for the future. 2011 assessment of country energy and climate policies*. World Energy Council, London, UK.

Varios autores (2007) PNAP, the National Priority Action plan for Reforestation for the Prevention of Soil Erosion. Ministry of Agriculture, Food and the Environment. Madrid.

Verges, R., La información asimétrica en el sector inmobiliario español (2), Observatorio Inmobiliario y de la construcción nº48/2011, Madrid, 2011.

Wang X., Chen D., Ren Z., Global warming and its implication to emission reduction strategies for residential buildings, Building and Environment issue 46 paginas 871-883, 2011.

Xing S., Su Z. Jun G., Inventory analysis of LCA on steel and concrete construction office buildings. Energy and buildings, 2008;40:1188-1193.

Yeheyis M., Hewage K., Alam M.S., Eskicioglu C., Sadiq R. (2013) An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. Clean Technologies and Environmental Policy 15: 81-91.

Zabalza I., Aranda A., Scarpellini S., Life cycle assessment in buildings: State of the art and simplified LCA methodology as a complement of building certification. Building and environment, 2009a;44,2510-2520

Zabalza I., Scarpellini S., Aranda A., Life cycle assessment in buildings. Vector1 Media, 2008a. <http://www.vector1media.com/articles/features/5202-life-cycle-assessment-in-buildings>.

Zabalza I., Tesis Doctoral, Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2011.

Zabalza I., Valero A., Aranda A. (2011) Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential, Building and Environment 46: 1133-1140.

