

RECICLAJE EN LA CONSTRUCCIÓN:

POSIBILIDADES DE REUTILIZACIÓN DE LA MADERA DE PALÉS

Claudia Patricia Vallelado Cordobés
Tutor: Luis Alfonso Basterra Otero
Septiembre, 2020.

A mi familia, mi gran inspiración. Y sobre todo a mi madre, por introducirme en el mundo de la arquitectura y ayudarme en cada paso que doy en él.

RECICLAJE EN LA CONSTRUCCIÓN: POSIBILIDADES DE REUTILIZACIÓN DE LA MADERA DE PALÉS

ALTERNATIVAS AL FIN DE VIDA ACTUAL. ARQUITECTURA CON PALÉS
Y GENERACIÓN DE NUEVOS MATERIALES Y SISTEMAS
CONSTRUCTIVOS

TUTOR: LUIS ALFONSO BASTERRA OTERO
DR. ARQUITECTO

AUTOR: CLAUDIA PATRICIA VALLELADO CORDOBÉS



ETSAVA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO DE FIN DE GRADO
GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer al departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras por brindarme la oportunidad de colaborar este año con ellos y acercarme al mundo de la investigación universitaria. Especialmente a mis compañeros de “despacho” por ayudarme a superar el miedo al papel en blanco y aportarme los primeros materiales por los que empezar.

En segundo lugar, a la empresa vallisoletana Maderas Pisuerga, por acceder a enseñarme sus instalaciones y dedicar parte de su tiempo a explicarme el proceso de fabricación de algunos productos de madera, e incluso proponerme vías de investigación para mi trabajo.

En tercer lugar, a Jesús por ayudarme a buscar imágenes aparte de haber sido mi apoyo continuo durante la carrera; a mi primera amiga de la universidad, Elena, por todas sus críticas constructivas en temas de maquetación y estilo, a María y Sara, por todos los ánimos y sacarme de casa cuando me bloqueaba, y a mis padres, mi tío Jesús y mi hermano por todos sus valiosos consejos y eterna confianza depositada en mí.

Por último, me gustaría agradecer especialmente a mi tutor, el profesor Dr. Luis-Alfonso Basterra Otero, por su cercanía y disponibilidad en todo momento superando las barreras impuestas por la situación del COVID-19; por la minuciosidad de sus correcciones y el gran valor de todos sus comentarios, y por el apoyo y seguridad que siempre me ha mostrado.

Resumen / Abstract

ES: Este trabajo propone formas adicionales de reciclaje de los palés basadas en su reutilización como elemento de construcción. El sector de la construcción tiene entre sus objetivos reducir su impacto ambiental. El empleo de productos de madera, como recurso renovable y que admite alto grado de prefabricación, puede contribuir de forma eficiente. Mediante el ecodiseño se consigue que los productos de madera reduzcan su impacto ambiental. Para ello conviene realizar un estudio minucioso de todas las fases de su ciclo de vida, desde el diseño y desarrollo del producto inicial hasta su final de vida. Además, la madera admite un uso escalonado. Es decir, una vez terminado la vida de un primer producto, con ese mismo material producir otro, y por último terminar incinerándolo.

El palé es un producto de madera ideal para su utilización en cascada. Aunque ya existe una potente industria de reciclaje de estos elementos, por la gran cantidad de ellos en circulación, aún suponen un grave problema de reciclaje. Se proponen otras formas de reciclaje basadas en la reutilización directa como elemento de construcción, la reelaboración para obtener materiales de construcción y la regeneración de la materia prima para producir derivados de la madera. De entre los productos que se pueden obtener a partir de la reelaboración, se desarrolla en detalle los paneles CLT por cuestiones de compatibilidad de dimensiones y fabricación, además de por su indudable interés dentro del campo de la economía circular.

Palabras clave: **Ciclo de vida, impacto ambiental, reciclaje, construcción, palés de madera, CLT.**

EN: This paper contributes to the literature on pallet recycling based on their reuse as a construction element. Timber products could contribute to manage the building industry goal of reducing its environmental impacts. Thus, timber products are a renewable resource with high level of preassembly. Furthermore, the eco design allows lower environmental loads of wooden products. With this purpose in mind, it is well worth studying all life-cycle stages, from the very first design and product development to the possible end-of-life. Besides, wooden admit a cascading use. In other words, it could be first reutilized in some other product before its incineration.

Pallets are very suitable to follow a cascading use. Albeit there is a strong recycling industry surrounding these items, they still involve a great recycling challenge because of their large quantity. Some recycling alternatives are proposed based on the direct reuse as a building system, the remanufacture to obtain construction materials or the reprocessing to produce wood-derived products. Out of all construction materials, in this study we have focused in CLT panels. Their dimensional and production compatibility and their highly interesting link with the bioeconomy, makes them the most attractive product to generate with recovered pallet wood.

Key words: **Life cycle, environmental impacts, recycling, construction, wooden pallets, CLT.**

Índice de contenidos

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN / ABSTRACT	4
OBJETIVOS	7
METODOLOGÍA	8
1 ESTADO DEL ARTE	10
1.1 VIDA ÚTIL ACTUAL DE LOS PRODUCTOS DE MADERA	16
1.1.1 PRIMERA FASE: Extracción de la materia prima	17
1.1.2 SEGUNDA A CUARTA FASE: Primera transformación en aserraderos, transformación intermedia en productos laminados o derivados y segunda transformación en el producto acabado de madera	18
1.1.3 QUINTA FASE: Uso y mantenimiento	19
1.1.4 SEXTA FASE: Fin de la vida del producto de madera. Gestor de residuos	20
1.2 CONCEPTO DE ECODISEÑO	22
1.3 CONCEPTO DE CASCADING	24
1.4 POSIBILIDADES DE REUTILIZACIÓN DE LA MADERA EN LA CONSTRUCCIÓN	29
2 LOS PALÉS DE MADERA	36
2.1 CICLO DE VIDA DE LOS PALÉS DE MADERA	39
2.2 LA OPORTUNIDAD DE RECICLAJE DE LOS PALÉS DE MADERA	42
3 AÑADIR UN ESCALÓN MÁS: POSIBILIDADES DE REUTILIZACIÓN DE LOS PALÉS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	48
3.1 REUTILIZACIÓN DIRECTA: EMPLEO DEL PALÉ COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	49
3.1.1 Mobiliario	51
3.1.2 Interiorismo	52
3.1.3 Construcciones efímeras	53
3.1.4 Refugios	55

3.1.5	<i>Fachadas ventiladas</i>	56
3.1.6	<i>Cerramientos</i>	57
3.1.7	<i>Estructuras</i>	59
3.2	REELABORACIÓN: REAPROVECHAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL PALÉ PARA GENERAR MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	60
3.3	REGENERACIÓN DE LA MATERIA PRIMA: TRITURACIÓN DEL PALÉ	63
4	FABRICACIÓN DE PANELES CLT CON MADERA DE PALÉS	66
4.1	PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS PANELES CLT.....	67
4.2	APLICACIÓN DE LA MADERA DE PALÉS EN LA FABRICACIÓN DE PANELES CLT	75
4.3	COMPROBACIÓN DE LA VIABILIDAD DE LA FABRICACIÓN DE PANELES CLT CON MADERA DE PALÉS.....	77
4.3.1	<i>Análisis del Ciclo de Vida</i>	78
4.3.2	<i>Análisis de Costes del Ciclo de Vida</i>	79
5	CONCLUSIONES.....	82
	LISTA DE REFERENCIAS.....	85

Objetivos

El objetivo del presente trabajo surge del interés creciente dentro del mundo de la arquitectura por el palé. Partiendo del auge de la utilización del palé para realizar todo tipo de arquitectura efímera y unido al aumento de interés en cuestiones de reciclaje, se plantea la siguiente cuestión a responder: ¿qué formas adicionales pueden proponerse de reciclaje de los palés, basadas en su reutilización como elemento de construcción?

Entorno a esta cuestión, aparecen otras derivadas sobre la situación actual de reciclaje de palés. Por un lado, se pretende comprobar la viabilidad del trabajo en un futuro desarrollo industrial, y, por otro, los impactos ambientales que genera este elemento y así averiguar qué fase de su ciclo de vida es la más perjudicial. Además, puesto que el objetivo es aplicarlo a la construcción, se trata de recabar información sobre cómo mitigar las consecuencias medioambientales negativas que conlleva el proceso constructivo, de manera que los elementos de construcción que se obtengan puedan colaborar a mejorar esta situación.

Por último, se busca proponer, de manera teórica, un desarrollo industrial de la forma de reciclaje que, por sus características, parezca a priori más interesante. Con esto se pretende esbozar un contexto y establecer un punto de partida para continuar una futura investigación más exhaustiva y centrada en este último aspecto.

Metodología

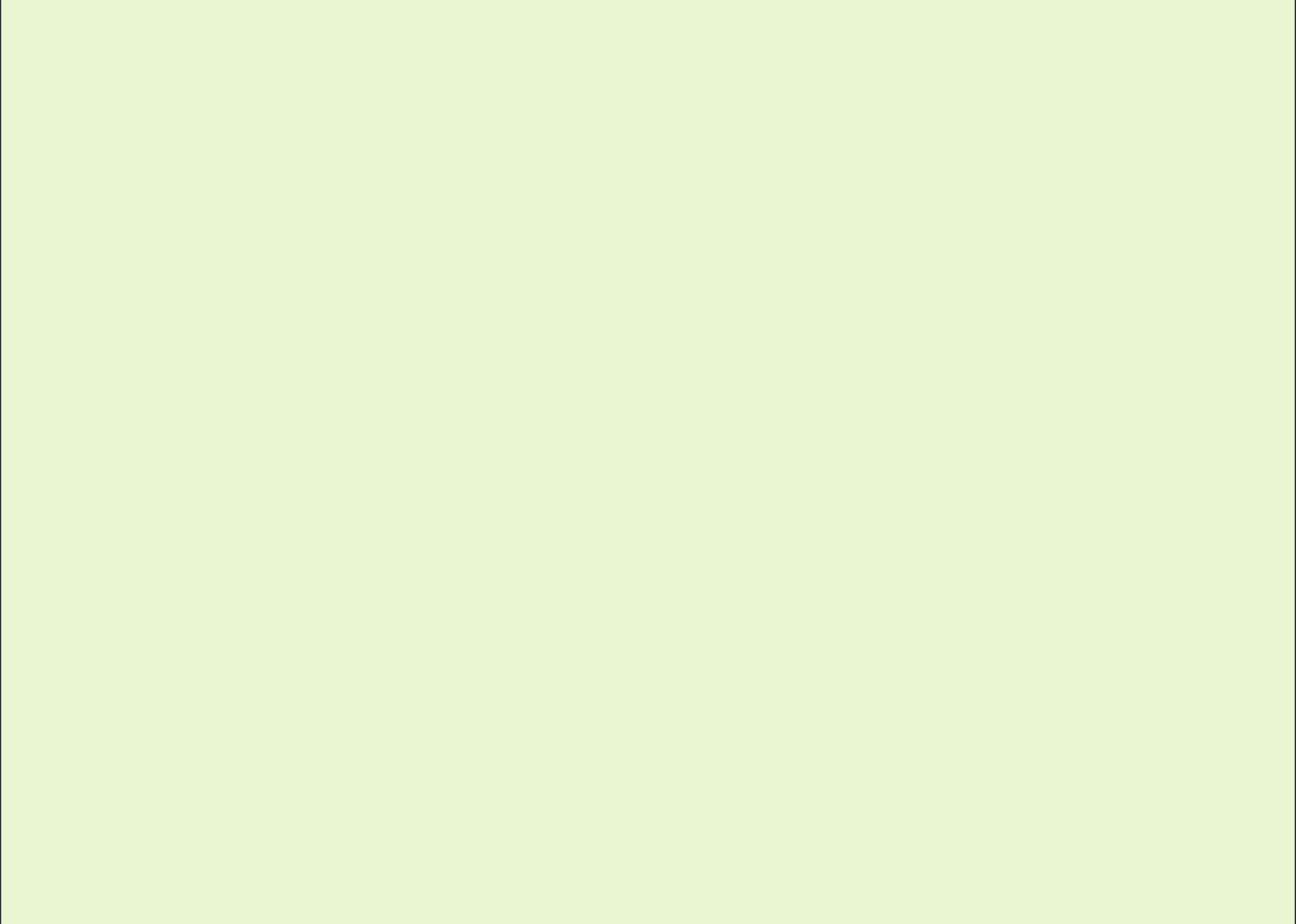
La metodología que se lleva a cabo en una investigación es fundamental para obtener los resultados deseados. Como punto de partida, se plantean las siguientes preguntas a las que se trata de responder: ¿Qué problemas medioambientales traen consigo los palés de madera?, ¿cómo darlos solución?, ¿esas soluciones pueden colaborar a mitigar los impactos de otros sectores como el de la construcción? ¿qué desarrollo existe acerca de estos temas? El trabajo se inicia dando una visión general sobre el proceso constructivo y la utilización en la construcción de la madera, junto con el ciclo de vida que tienen sus productos, y realizando un riguroso estudio sobre su evolución, desarrollo industrial y las nuevas vías de prolongación del ciclo de vida que están surgiendo entorno a este material.

Una vez situados en contexto, el trabajo de adentra en términos más específicos, centrándose en un único producto de madera: los palés. Analiza su ciclo de vida actual y busca alternativas de reciclaje que permitan revalorizar la madera que contienen para obtener elementos y productos de construcción. Finalmente, nos focalizamos en uno de estos productos, los paneles CLT, ya que es un producto en auge con prometedoras características que fomentan la economía circular.

La estructura que se ha estimado oportuna para alcanzar los objetivos planteados consta de cuatro capítulos a los que se añaden, para finalizar, las conclusiones. Para conseguir enfocar desde una visión general a una más específica, la información quedará repartida de la siguiente manera:

A lo largo del primer capítulo se analiza de manera general el desarrollo del proceso constructivo y las potenciales mejoras que se pueden implementar con la introducción de productos de madera. Se desarrolla el ciclo de vida de un producto de madera y se exponen los conceptos de ecodiseño y cascading en relación a la necesaria mejora de la eficiencia de uso de este material. El segundo capítulo muestra generalidades sobre los palés, definiéndolos minuciosamente y diferenciando sus opciones de ciclo de vida específicas. Durante el tercer capítulo, el discurso se centra en tres potenciales alternativas de reciclaje de los palés de madera, mostrando en cada una de ellas diversos ejemplos. Por último, el cuarto capítulo se ocupa de desarrollar uno de los productos mencionados en el capítulo anterior: los paneles CLT. Tras definir CLT y su proceso de elaboración, se desarrolla de manera teórica como se podría desarrollar este producto empleando la madera recuperada de palés en vez de madera virgen aserrada.

Para aportar veracidad, precisión y efectividad a este trabajo, se ha analizado rigurosamente la información sobre el ámbito tratado, a través de manuales, recursos online, entrevistas, artículos contrastados etc. Además, éste ha ido encaminándose pausadamente mediante correcciones y reuniones telemáticas con el tutor debido a las circunstancias actuales.



1 Estado del arte

Sostenibilidad, reciclaje, energías limpias... son términos que han pasado a formar parte de nuestra vida cotidiana. Pero ¿son aplicables al sector de la construcción? La respuesta es sí. El inicio del proceso constructivo, pasando por la vida útil del edificio y finalmente su demolición traen consigo actualmente consecuencias medioambientales negativas.

Es bien sabido que el sector de la construcción desarrolla actividades con gran impacto ambiental. Los edificios resultantes, así como las infraestructuras necesarias construidas para su utilización, invaden y transforman el medio en el que se ubican.

Según la norma UNE-EN 15978: 2012 existen cuatro etapas para el análisis del ciclo de vida de una edificación a mayores de la etapa de uso (Fig. 1): A1-3 etapa de fabricación, A4-5 etapa de construcción, B etapa de uso, C etapa de fin de vida y D beneficios y cargas más allá del ciclo de vida.

Todas ellas colaboran en gran medida al deterioro del medio ambiente. La extracción de materias primas y el consiguiente agotamiento de recursos no renovables, la energía utilizada y el consumo de recursos fósiles, la generación y deposición de materiales de desecho y residuos están presentes en todas y cada una de las etapas.

Traducido a números se puede decir que:

- Se necesitan más de 2 toneladas de materias primas por cada m² de vivienda que construimos;
- la cantidad de energía asociada a la fabricación de los materiales que componen una vivienda puede ascender, aproximadamente, a un tercio del consumo energético de una familia durante un periodo de 50 años;
- la producción de residuos de construcción y demolición supera la tonelada anual por habitante (ITeC, 2006).
- En la Unión Europea, la actividad constructiva consume alrededor de un 40% de la energía total y se estima que más de un cuarto de ésta podría ser ahorrada (Comisión Europea, Dirección General de Energía y Transporte, 2007). La etapa de uso de un edificio supone un 60-90% de la carga ambiental, sobre todo debido a la demanda de calefacción y/o refrigeración. Incluso en regiones climáticas

Ciclo de vida de un edificio:	Fase de producción 	A1	Adquisición de la materia prima
		A2	Transporte
		A3	Fabricación
	Fase de construcción 	A4	Transporte
		A5	Proceso constructivo
	Fase de uso, vida del edificio 	B1	Utilización de los productos instalados
		B2	Mantenimiento
		B3	Reparación
		B4	Sustitución/renovación
		B5	Rehabilitación del edificio
		B6	Energía utilizada en las operaciones
		B7	Gasto de agua en las operaciones
	Fase de fin de vida 	C1	Demolición
C2		Transporte	
C3		Gastos de gestión de residuos	
C4		Vertedero	
Información adicional	Potenciales beneficios y cargas ambientales 	D	Potencial recuperación, reutilización y reciclaje de los materiales

Fig. 1 Etapas del ciclo de vida para elaborar el LCA de acuerdo con la norma EN15978

Fuente: Elaboración propia basada en Takano et al (2015).

distintas se mantiene este rango de porcentajes constante (Buyle et al., 2013)

En este contexto se podría indicar que la reducción del impacto ambiental de este sector se centra en tres aspectos: a) El control del consumo de recursos; b) la reducción de las emisiones contaminantes; y c) la minimización y la correcta gestión de los residuos que se generan a lo largo del proceso constructivo y de la vida útil del edificio (ITeC, 2006).

Con estos datos, es lógico que la Unión Europea haya apostado por crecer hacia un desarrollo sostenible, reduciendo el impacto ambiental de los edificios en todo su ciclo de vida. Las distintas políticas, empresas e investigaciones se centran en conseguir estrategias encaminadas esencialmente hacia la reducción del consumo energético (Comisión Europea, Dirección General de Energía y Transporte, 2007).

Se ha recorrido un largo camino hasta llegar a los edificios de consumo cero -estándar "Passive-haus", o similares- diseñados buscando la mayor eficiencia energética y el confort térmico de sus usuarios. Por tanto, una vez reducido el impacto ambiental de la etapa de uso, el resto de las etapas comienzan a tomar importancia. En este sentido, se empieza a prestar mayor atención a los sistemas constructivos, la elección de materiales y los posibles escenarios a los que puede estar sometido el final del ciclo de vida del edificio. Son las nuevas etapas "más contaminantes".

Durante la construcción, se consumen una gran cantidad de recursos, que además de contribuir a la degradación de la superficie terrestre y acarrear importantes impactos económicos, crean daños irreversibles tanto sobre el entorno natural como sobre la salud de las personas.

Los nuevos métodos de construcción han de dar respuesta a los requisitos crecientes de sostenibilidad, tratando de ejecutar obras con menores plazos de tiempo y más concienciadas con el medio ambiente, el gasto de energía y la economía (Svajlenka et al., 2017). La tendencia actual del desarrollo de la construcción se dirige hacia la prefabricación de los elementos constructivos en taller con el fin de conseguir una mayor eficiencia, por un lado, del material, ya que se pueden generar piezas más precisas que las elaboradas en obra; y, por otro, en los tiempos de construcción e integración en el lugar, al generar elementos que en obra únicamente necesiten ser ensamblados. Es decir, se consigue una mayor calidad con menor gasto de materia prima y reduciendo el tiempo de ejecución. La prefabricación busca precisamente esta simplificación de la etapa de construcción del edificio, pues gran parte de su impacto ambiental viene dado por la complejidad del proceso constructivo (Takano et al., 2015).

Si partimos de la definición de que un recurso natural es aquel elemento procedente de la naturaleza que la sociedad, con su tecnología, es capaz de transformar para su propio beneficio (Yeang, 1999), podremos diferenciar

entre recursos renovables y no renovables. Tal y como explica el ITeC (2006), la energía que nos llega a través del sol, es un recurso renovable, que equivale a decir que “no se agota”; mientras que la procedente del petróleo o de otros combustibles fósiles es no renovable, pues sus existencias son limitadas y su regeneración depende de un proceso natural que requiere millones de años.

No debemos olvidar que el aprovechamiento de un determinado recurso natural no debe afectar al equilibrio ecológico que lo sostiene y que es responsable de su existencia. Un ejemplo claro es la madera: las explotaciones forestales han de ser compatibles con su capacidad de regeneración. Las replantaciones deberían producir nueva materia prima, como mínimo, al ritmo de la explotación, con el fin de no agotar este recurso, renovable por definición (ITeC, 2006).

También existe otra interesante posibilidad, introduciendo el concepto de reciclaje. Considerar los residuos como un bien, es decir, aprovecharlos como materia prima mediante reciclaje o reutilización, e incorporarlos de nuevo al proceso productivo es un objetivo que ha de hacerse presente.

De esta forma, la madera aparece como un material versátil y ecológico, con un gran potencial para mitigar el cambio climático. Primero, los árboles actúan como reserva de carbono. Después, los productos de madera pueden



Fig. 2 Recursos naturales.

Fuente: <https://tecreview.tec.mx/recursos-naturales-2018-estan-a-punto-agotarse/>



Fig. 3 Troncos de madera cortada apilados.

Fuente: <https://seranca.com/lo-que-necesitas-saber-sobre-una-plaga-en-madera/>

sustituir a otros obtenidos a partir de recursos limitados y que necesitan más energía para su fabricación. Y, por último, pueden sustituir a los combustibles fósiles para terminar el ciclo de vida del producto. La madera se considera, además, una materia prima renovable, siempre y cuando se cumplan las políticas de gestión forestal sostenible.

La certificación forestal trata de verificar que los productos de madera o derivados provienen de un bosque gestionado de manera sostenible. Las empresas forestales o propietarios de una superficie forestal deciden someterse voluntariamente a este proceso de evaluación, que lleva a cabo una tercera parte independiente. Existen dos opciones de certificación forestal:

- Certificación de Gestión Forestal: se centra en el origen de la materia prima y la gestión sostenible del bosque.
- Certificación de Cadena de Custodia: estudia la trazabilidad del producto durante su cadena de producción, desde que se extrae la materia prima hasta que se obtiene el producto final.

Los productos de madera que provienen de una gestión forestal sostenible aparecen marcados con un certificado acreditativo como los estándares FSC (Consejo de la administración forestal) y PEFC (Sistema Paneuropeo de certificación forestal).

- FSC: El objetivo principal trata de “promover una gestión forestal ambientalmente apropiada, socialmente beneficiosa y económicamente viable de los bosques del mundo.” (FSC España, 2020). El Consejo de la Administración Forestal es una organización independiente, no gubernamental y sin ánimo de lucro.
- PEFC: Se centra en “asegurar que los bosques del mundo sean gestionados de forma responsable, y que su multitud de funciones estén protegidas para generaciones presentes y futuras.” (PEFC España, 2020). PEFC España es una entidad sin ánimo de lucro, abierta a la participación de asociaciones de ámbito estatal o sectorial, productores forestales, industriales, comerciantes, consumidores u ONG interesadas en la gestión forestal sostenible.

En los últimos años, existe un interés comercial creciente por la madera, intensificado sobre todo por la subida de los precios de los combustibles fósiles (Höglmeier et al., 2017). La gestión eficiente de esta materia prima y su uso como material de construcción, especialmente en estructuras, aporta al ciclo de vida del edificio beneficios medioambientales; aparte de por sus propiedades intrínsecas, también debido a su bajo peso en comparación con las estructuras convencionales de hormigón además del alto grado de prefabricación que admite.

Algunas de las principales ventajas de las viviendas construidas con madera, en comparación con las construidas con ladrillo y hormigón, son: diseño de bajo coste alcanzando un modelo cercano al consumo cero durante su etapa de uso con mayor facilidad, percepción de casas saludables, periodo relativamente corto de construcción, menor impacto ambiental, material más optimizado... En el estudio realizado por Svajlenka et al. (2017) se evidencian estas ventajas en términos relativos comparando una vivienda de madera con otra exactamente igual realizada de fábrica de ladrillo. Se obtienen una reducción al 35% de las emisiones de SO₂, que definen el potencial de acidificación; un 156% de reducción del potencial de calentamiento global, y un periodo de obras reducido al 48%, en parte gracias a que afirman que el 50% de las actividades en obra pueden ser ejecutadas en fábrica, con lo que se reduciría considerablemente la contaminación acústica y la generación de polvo y residuos.

Si hablamos de la etapa del final de vida de los edificios, tradicionalmente se procede a su demolición generando grandes cantidades de escombros que posteriormente hay que transportar, tratar etc. Sólo las actividades de construcción y demolición generan 900 millones de toneladas de residuos cada año en la Unión Europea, lo que supone aproximadamente el 25-30 % de los residuos totales originados. Su mala gestión además de traer consigo consecuencias medioambientales como la aceleración del ritmo de colmatación de los vertederos, aumento del número de viajes necesarios

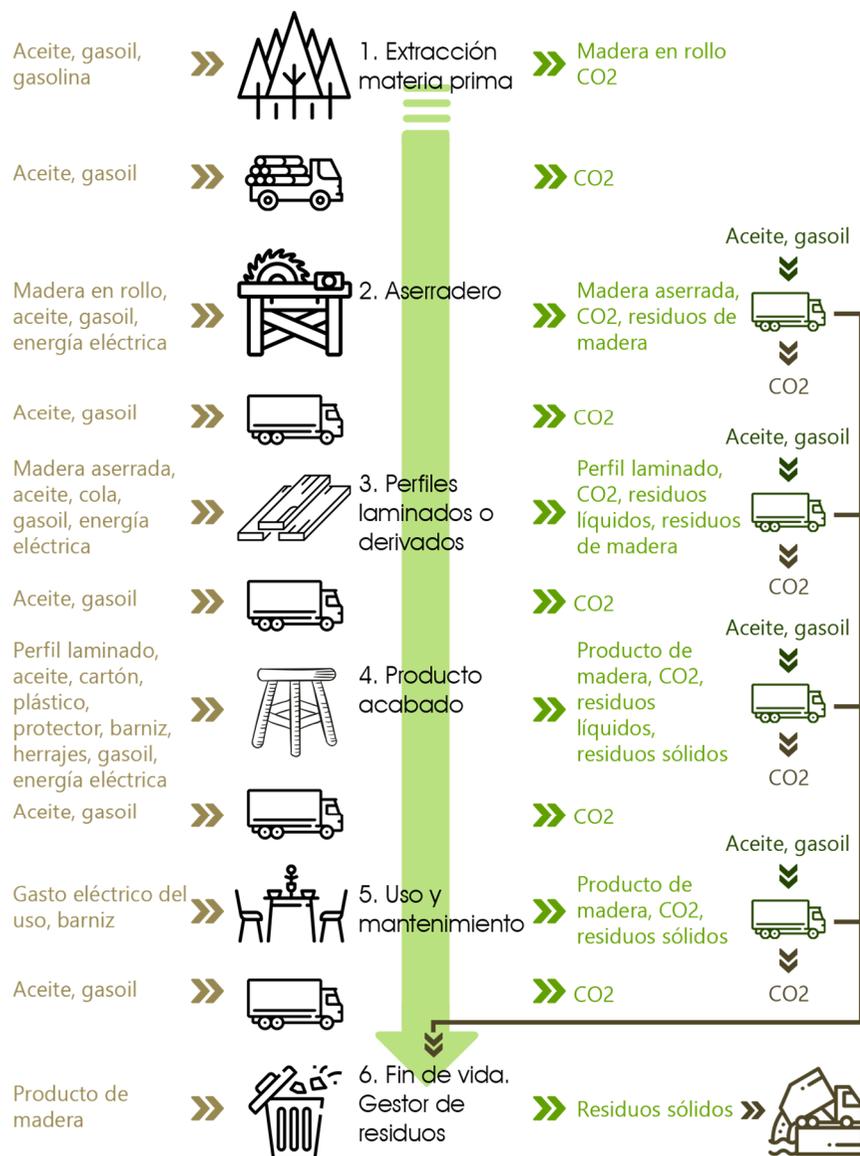


Fig. 4 Ciclo de vida de un producto de madera.
Fuente: Elaboración propia basada en Llorente Díaz (2011).

para su transporte y dificultad en la valorización de los residuos (ITeC, 2006), también crea importantes pérdidas de material que hacen a la Unión Europea aún más dependiente en importación de materias primas (EC, 2010). Muchos de estos materiales son reutilizables, reciclables o revalorizables. De hecho, el sector de la construcción tiene unos prerequisites ideales para implantar en él un alto grado de reciclaje (Teischinger and Kalcher, 2016). Es por ello por lo que se promueve su tratamiento mediante un objetivo obligatorio en toda la UE:

Antes de 2020, deberá aumentarse hasta un mínimo del 70 % de su peso la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, incluidas las operaciones de relleno que utilicen residuos como sucedáneos de otros materiales, de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y de las demoliciones, con exclusión de los materiales presentes de modo natural definidos en la categoría 17 05 04 de la lista de residuos. (Artículo 11.2 b, DIRECTIVA 2008/98/CE)

En base a esto, dentro de los desechos provenientes de la construcción podemos diferenciar tres categorías: residuos inertes, residuos no peligrosos y residuos peligrosos. En la categoría de residuos no peligrosos, precisamente, se encuentran los procedentes de la madera. Los restos de corte, los restos de encofrado, los embalajes y los palés son los residuos más habituales (ITeC, 2006). En las demoliciones, además, se generan otros escombros muy voluminosos procedentes de los elementos estructurales de

los edificios. Se estima que más de la mitad de los desechos de madera, en una segunda vida, pueden ser reconvertidos en productos de calidad (Takano et al., 2015) Precisamente una de las muchas ventajas de emplear la madera como material de construcción es la posibilidad de reutilización y revalorización que tiene. Por ello, para la construcción en madera, es muy importante diseñar los elementos pensando desde el principio en sus posibles escenarios de fin de vida.

El Parlamento Europeo (2018) define economía circular como “modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido.” Este cambio supone una reducción notable de los residuos, una prolongación del ciclo de vida de los materiales y la generación de un valor añadido en estos. Cuando un producto llega a su fin de vida, los materiales se mantienen dentro de la economía siempre que se pueda para su reutilización.

La economía circular contrasta con el modelo económico tradicional basado en el uso de los materiales y productos siguiendo una dinámica lineal de usar y tirar. Se trata de uno de los principales objetivos políticos europeos contemporáneos. La Unión Europea avanza hacia la economía circular o bioeconomía prestando especial atención a la reducción de desechos y eficiencia de los recursos y a la productividad de la industria y los negocios

asociados (Husgafvel et al, 2018). Para la consecución de este nuevo modelo, toman especial relevancia el estudio del ciclo de vida de los productos, los procesos de diseño y producción, la forma de uso de los recursos y la generación de residuos a lo largo del ciclo de vida.

1.1 Vida útil actual de los productos de madera

El ciclo de vida de casi cualquier producto se resume en la fase de producción, fase de uso y final de vida. Más detalladamente, Llorente Díaz (2011) define siete fases de ciclo de vida (Fig. 4) válidas para la gran mayoría de productos de madera, bien sea en su totalidad o parte de ellas:

1. Extracción de la materia prima.
2. Primera transformación en aserraderos.
3. Transformación intermedia en perfiles laminados o derivados.
4. Segunda transformación en el producto acabado de madera.
5. Uso y mantenimiento.
6. Fin de la vida del producto de madera. Gestor de residuos.

Estas seis fases están dispuestas en orden cronológico, y, a mayores hay que tener en cuenta que cada una de ellas produce residuos por lo que el gestor de residuos no aparece únicamente al final del ciclo. Además, en el intermedio de las fases se lleva a cabo el transporte de los elementos extraídos o manufacturados. El transporte es la séptima fase.

Las cuatro primeras fases constituyen la etapa de producción del producto, la quinta la etapa de uso y la sexta el fin de vida.

A continuación, se procede a describir y concretar cada una de las posibles fases del ciclo de vida de los productos de madera:

1.1.1 PRIMERA FASE: Extracción de la materia prima

En la extracción de la materia prima están incluidas todas las actividades necesarias para la adquisición de madera hasta que ésta llega al aserradero.

Al contrario del pensamiento mayoritario acerca del vínculo- causa efecto entre el uso de la madera y la deforestación, un aumento del uso de madera favorece la implementación de políticas de gestión de bosques. Por tanto, se fomenta un mayor mantenimiento de estos e incluso un aumento de superficie dedicada a plantaciones arbóreas. La creación de un valor de mercado para los bosques es un importante incentivo para su conservación (CEI-Bois, 2009).

Por supuesto, no todos los bosques cumplen estas condiciones. En los bosques tropicales y subtropicales sí que se está produciendo una deforestación severa y, sin embargo, tampoco es debido al aumento de utilización de la madera, si no por razones sociopolíticas y de aprovechamiento de los escasos recursos disponibles en algunas zonas del mundo, que se salen del tema de este trabajo.

No obstante, la realidad actual de los bosques templados, y especialmente en los países desarrollados, es muy distinta. Concretamente en Europa se está viviendo un crecimiento forestal de aproximadamente 661.000 hectáreas por año. De estos bosques se obtienen 360 millones de metros cúbicos de madera en rollo industrial al año. De hecho, en la práctica, sólo un 64% del incremento anual es cortado (Parvianien et al, 2000). Como se puede concluir a partir de estos datos, la disponibilidad de madera en Europa es cada vez mayor, como resultado a una correcta gestión, que convierte la madera en un recurso además de natural, renovable.

La gestión de los bosques garantiza la regeneración de los árboles. La tala de árboles cuando estos llegan a su madurez, permite que los productos de madera resultantes almacenen a lo largo de su vida útil la mayor parte del carbono. Aunque, por supuesto, la regeneración también se produce de manera natural: los árboles al final de su vida mueren y se pudren o queman, produciendo CO₂ a partir del carbono acumulado. El crecimiento ocurre aproximadamente al mismo ritmo que la putrefacción. Es decir, que sin gestión forestal no se produce un aumento neto del almacenamiento de carbono (CEI-Bois, 2009). Los bosques gestionados se consideran sumideros de carbono, y son mucho más eficientes que los bosques que se regeneran de manera natural: los árboles jóvenes absorben mayores cantidades de CO₂ que los árboles maduros.

La gestión forestal sostenible consiste en la explotación de los bosques y las superficies forestales de tal manera, y con tal intensidad, que se preserven su biodiversidad, productividad, capacidad de regeneración, vitalidad y potencial para cumplir, ahora y en el futuro, funciones ecológicas, económicas y sociales significativas tanto a nivel local y nacional como global, sin ocasionar daños a otros ecosistemas. (Comisión Europea 2013)

1.1.2 SEGUNDA A CUARTA FASE: Primera transformación en aserraderos, transformación intermedia en productos laminados o derivados y segunda transformación en el producto acabado de madera

El proceso en el aserradero comienza con la recepción de la madera en rollo y termina con la salida de la madera aserrada para enviarla al siguiente escalón industrial. Se realiza el descortezado, aserrado, secado y posterior cepillado para obtener la madera aserrada.

En este proceso se generan residuos de madera y vertidos de cenizas al suelo. Los primeros son aprovechables para productos derivados de la madera y las cenizas que se generan durante el secado se consideran vertidos beneficiosos como acondicionadores y/o fertilizantes del suelo.

La industria maderera se considera uno de los posibles focos de desarrollo rural. Generalmente los aserraderos se ubican en zonas con abundante bosque, suelen ser áreas alejadas de las más importantes ciudades, y con un

menor desarrollo industrial. Supone una contribución fundamental para la economía del medio rural. La industria de la transformación de la madera es una de las fuentes de empleo más importantes de los Estados Miembros de la Unión Europea y se encuentra entre las 3 industrias más importantes en Austria, Finlandia, Portugal y Suecia (Parlamento Europeo, 2020). Además, las características de estos trabajos permiten calificarlos como “empleo verde”.

Una de las principales fuentes de energía de esta industria es la biomasa obtenida de los desperdicios de la propia madera. En muchas ocasiones suponen una contribución neta a las redes energéticas nacionales. Actualmente el 75% de la energía requerida para el secado de la madera se genera mediante biomasa (CEI-Bois, 2009). Tradicionalmente se han aprovechado los residuos de madera en la propia industria como forma de obtención de energía, pues se empleaban aquellos fragmentos que no eran adecuados para la fabricación del producto principal. Esto hace que el sector de la madera sea plenamente sostenible y genere escasos residuos.

No todos los productos de madera pasan por la fase intermedia y de segunda transformación, estas son las fases de acabado del producto. Los productos de madera maciza no pasarán por la fábrica de perfiles laminados e irán directamente a la fábrica correspondiente para transformar la madera aserrada en el producto final. Por otro lado, hay productos que salen terminados de las fábricas correspondientes, como pueden ser las vigas

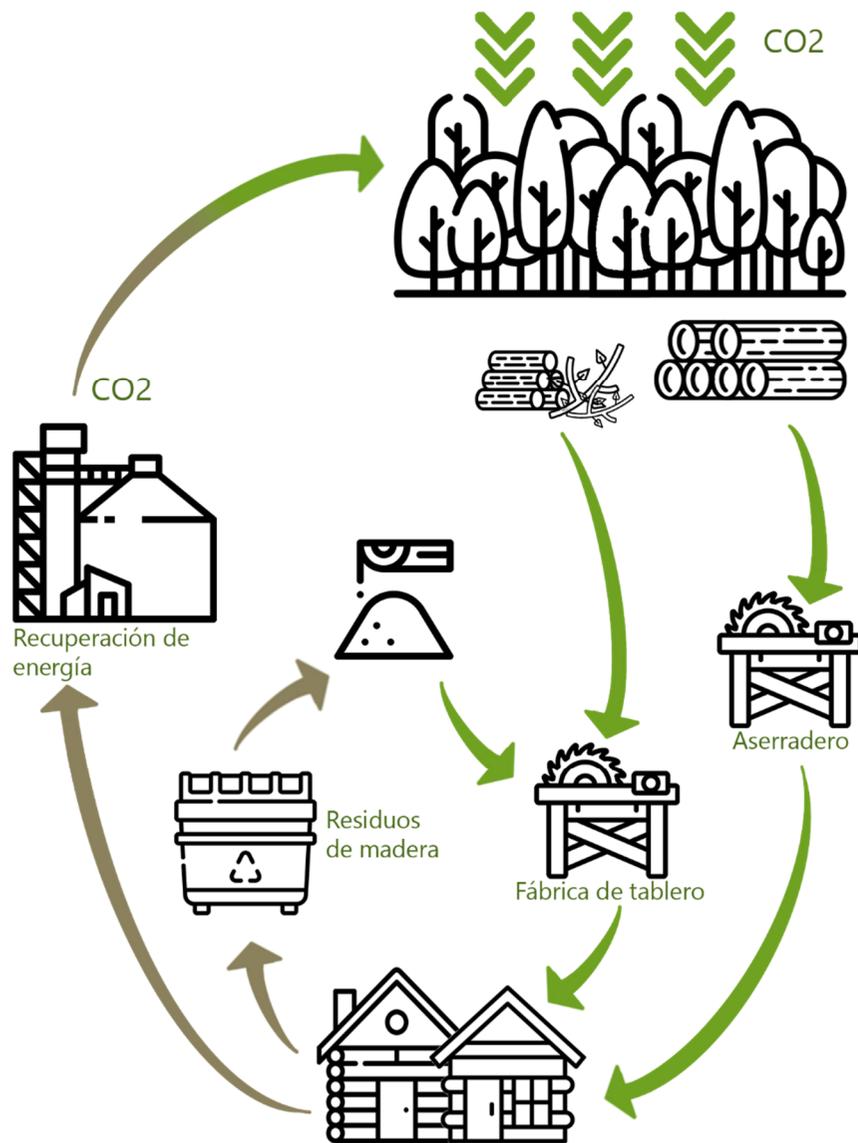


Fig. 5 Ciclo de carbono de los productos derivados de la madera.
Fuente: Elaboración propia basada en CEI-Bois (2009).

laminadas, los paneles CLT y algunos otros productos de construcción en madera. La transformación intermedia también puede incluir el triturado de la madera para producir tableros de partículas.

A mayores de la madera, en estas fases intervienen otros productos, como pueden ser los distintos tipos de colas y adhesivos que se emplean, los barnices, lacados, aceites y demás tipos de acabados y protecciones superficiales de la madera. También están incluidos los embalajes, gomas y demás protecciones para su transporte, los herrajes necesarios para conformar el producto etc.

1.1.3 QUINTA FASE: Uso y mantenimiento

El proceso comienza desde que el producto acabado de madera llega al lugar donde va a ser instalado hasta que se recoge el producto para transportarlo al gestor de residuos. En esta fase influye la durabilidad de los productos y por supuesto su mantenimiento.

Como se ha mencionado anteriormente, los productos de madera son almacenes de carbono, aumentan el período en el que el CO₂ atrapado en los bosques se mantiene fuera de la atmósfera. Además, tal y como se ha comentado anteriormente, una mayor demanda de productos de madera fomenta el crecimiento y calidad de los bosques, con beneficios indirectos

como la fijación de suelos degradados, mitigación de la erosión, aumento de la biodiversidad, potencial destino de ocio, entre otros.

Si nos centramos en la utilización de la madera en la construcción, la Confederación Europea de Industrias Madereras (CEI-Bois) asegura que cuanto más alto sea el contenido de madera en un edificio, menos será su impacto ambiental. La tendencia actual de la legislación europea es la de fomentar el uso de la madera en la construcción e incluso tratar de implantarla como material alternativo del acero y el hormigón. La vida de servicio media de una casa de madera está entre 80 y 100 años, y sus costes de mantenimiento no tienen por qué ser superiores a los de otros materiales.

1.1.4 SEXTA FASE: Fin de la vida del producto de madera. Gestor de residuos

Cuando la madera o el producto derivado termina su primera vida útil pueden darse cuatro posibles escenarios:

- Reutilización.
- Reciclaje.
- Incineración como fuente de energía.
- Degradación en el vertedero.

El gestor de residuos se encarga de recoger todos los desechos de cada proceso, clasificarlos y derivarlos a reciclaje o al vertedero. Y, aunque en

general, la industria maderera produce muy poco desecho, los residuos pueden emplearse como producto secundario o como fuente de energía. Los recortes, el serrín y las virutas se trituran para producir tablero de partículas, para la industria de pasta y papel o para generar energía.

La Comisión Europea (2019) estima un consumo de madera anual de 160 millones de toneladas, de las cuales 15 millones se reciclan cada año. Desde la Comisión se están elaborando políticas para que se incremente el porcentaje de reciclado, como el control de los embalajes, obligando a que al menos el 15% de todos los de madera sean reciclados.

Actualmente, la reutilización de palés y embalajes se basa fundamentalmente en su reparación empleando partes de otros palés dañados o incluso incluyendo piezas de madera nueva. Una parte también se deriva al triturado para producción de tableros de partículas o se emplean como biomasa para producir energía. A mayores, están surgiendo otras alternativas como elementos decorativos, mobiliario o elementos constructivos.

Para la industria maderera, el reciclaje es una parte intrínseca del proceso de fabricación de productos sostenibles. La producción de tableros que aprovecha la madera reciclada está aumentando. La Federación Europea del Tablero establece unos requisitos de calidad para asegurar que todos los tableros sean seguros y respetuosos con el medio ambiente, independientemente de donde provenga la materia prima.

Como se ha venido diciendo, la gestión eficiente de los residuos de madera genera un ciclo de carbono enormemente beneficioso para el medio ambiente (Fig. 5). Este ciclo implica una primera etapa de uso del producto, una posible reutilización o reciclaje y un fin de la vida como fuente de energía neutra de carbono incinerándolo.

La enorme popularización que ha tenido la madera como fuente de energía renovable, bien sea con calderas de biomasa o en plantas de energía, ha hecho necesario tratar de establecer un equilibrio entre el uso energético de la madera y su uso como producto. Indudablemente. Cuanto más largo sea

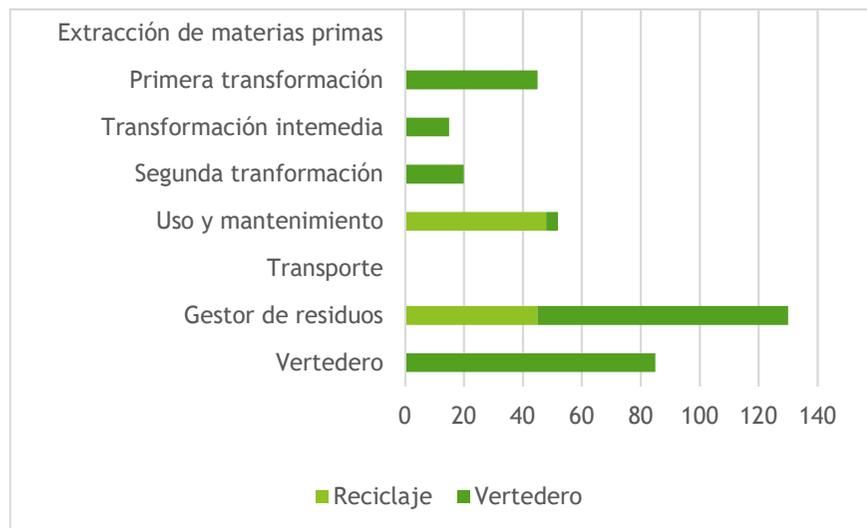


Fig. 6 Contribución de residuos por procesos.
Fuente: Llorente Díaz (2011)

el periodo de vida del producto de madera o derivado antes de su incineración, el ciclo de carbono obtiene mejores resultados.

El estudio realizado por Kim, M. H. y Song, H. B. (2014), demuestra que el uso de los residuos de madera para la fabricación de tablero de partículas como forma de reciclaje es más favorable desde el punto de vista medioambiental frente a su incineración. Defienden que aparte de fomentar el reciclaje, se deber realizar un estudio de aquellas prácticas de reciclaje que más colaboran a mitigar el cambio climático y a reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, para fomentarlas o darlas preferencia. Además, abogan por realizar una clasificación de los deshechos de madera y así derivar aquella de mayor calidad a la producción de tableros y la de menor calidad a incineración para la obtención de energía.

La producción de energía a partir de la quema de madera al final de su vida es considerada de emisiones cero debido al ciclo natural del carbono: la madera captura y almacena dióxido de carbono de la atmósfera a partir de la fotosíntesis. Cuando un producto de madera se quema al final de su vida, el carbono que contiene es reemitido a la atmósfera. Por lo tanto, el balance de carbono es cero. Por esto se considera que los productos de madera tienen un ciclo de vida.

Aunque es cierto que los productos de madera apenas producen residuos sólidos en los vertederos ya que en su mayor parte se recicla, hace falta una

investigación en nuevos métodos de reciclaje de productos de madera no destructivos. El final de vida de estos productos es su trituración, que genera productos con características más pobres que los productos de madera iniciales, o incineración. Quizá, antes de proceder a degradar el material, convendría realizar una clasificación para poder alargar más su ciclo de vida y convertir a la madera en un material aún más sostenible (Falk, 1997).

A pesar de todo lo comentado anteriormente, aún queda mucho trabajo para conseguir que todos los productos de madera tengan realmente un ciclo de vida. Aunque se está incentivando considerablemente el reciclaje, una buena cantidad de estos residuos acaba en vertederos donde se clasifica y acumula hasta su degradación (Fig. 6).

Los mayores impactos ambientales acorde a la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida que realiza Llorente Díaz (2011), se producen en el proceso de vertedero. En España, el 90,63% de los residuos en vertederos son de madera. Afortunadamente, la creciente conciencia medioambiental en España está transformando estos resultados hacia un mayor porcentaje de madera reciclada.

1.2 Concepto de ecodiseño

Todos los productos, a lo largo de las etapas de su ciclo de vida, tienen impacto ambiental, ya sea en todas ellas o en alguna. En los últimos años se han desarrollado múltiples formas de evaluación del comportamiento

ambiental de los productos. Llama la atención que la mayoría de éstas únicamente tienen en cuenta el producto de manera aislada sin considerar las cuestiones de diseño de las primeras etapas de producción (Bovea y Pérez-Belis, 2011). Sin embargo, la fase de diseño es considerada una de las fases con mayor influencia en la sostenibilidad del producto final. A mayores de decidir los materiales y el proceso de fabricación, el diseño influye de manera notable en el resto de fases del ciclo de vida del producto (Ramani et al, 2010). La integración de temas medioambientales desde el diseño hace posible la consecución de un producto más sostenible. En este ámbito de desarrollo industrial es donde surge el ecodiseño.

Hermida Balboa y Domínguez Somonte (2014) definen ecodiseño como una metodología para el diseño industrial en la que el medio ambiente se tiene en cuenta durante el proceso de desarrollo del producto como factor adicional a los tradicionales. El principal objetivo que se busca al introducir los aspectos ambientales en el diseño y desarrollo de los productos es la mitigación de los impactos ambientales adversos a lo largo de su ciclo de vida (UNE-ISO/TR 14062). En el ecodiseño se tienen en cuenta todas las fases del ciclo de vida, incluida la de diseño, a la hora de calcular los impactos ambientales.

Los conceptos de ecodiseño y desarrollo sostenible además de ser interesantes para un negocio comprometido con el medio ambiente,

también le marcan unas guías a seguir para mejorar la su eficiencia. Es por ello que una gran cantidad de organizaciones se están animando a integrar los aspectos ambientales en el diseño y desarrollo del producto. Algunos de los beneficios potenciales que se pueden obtener son (UNE-ISO/TR 14062 y Hermida Balboa y Domínguez Somonte, 2014):

- Mejora de la imagen corporativa por ejemplo mediante el empleo de energías más limpias y la consecución de productos más sostenibles y eficientes, la superación de las expectativas del cliente, el aumento de motivación entre los empleados...
- Mejora de la continuidad empresarial.
- Reducción de los costes de producción gracias a la optimización del uso de recursos y energía y minimización de los costes de manipulación de residuos.
- Optimización de la calidad y aumento de la vida útil de los productos.
- Posibilidad de identificar nuevos productos a partir de materiales que anteriormente eran rechazados.

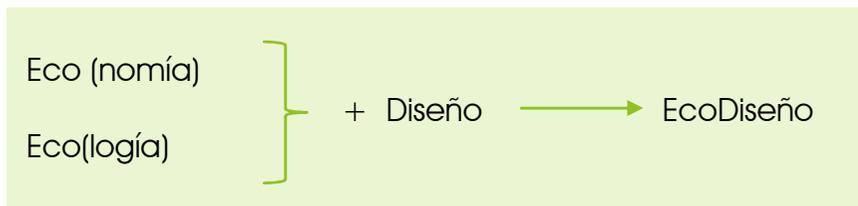


Fig. 7 Formación lingüística de la palabra “ecodiseño”.
Fuente: elaboración propia basada en Karlsson y Luttrupp, 2006.

- Las inversiones y fuentes de financiación de aquellos que invierten con conciencia ambiental son atraídas por proyectos que apuestan por el ecodiseño.
- Reducción de los riesgos de responsabilidad legal mediante la disminución de los impactos ambientales.

La correcta implementación del ecodiseño en los sistemas de gestión empresarial depende de aspectos comerciales convencionales y de aspectos sociales y psicológicos (Karlsson y Luttrupp, 2006). Además, el modo de aplicación del ecodiseño en una empresa viene marcado por el objetivo que ésta se fije, pues en función de ello se pueden obtener resultados muy diferentes. Hermida Balboa y Domínguez Somonte (2014) distinguen cuatro niveles de ecodiseño en función del objetivo a seguir:

1. Mejora del producto, progresiva e incremental.
2. Rediseño del producto. Se genera un nuevo producto sobre la base del existente.
3. Nuevo producto en concepto y definición que supone una innovación radical.
4. Definición de un nuevo sistema.

Estas empresas, deben fijarse un objetivo a seguir, y además establecer, documentar, implementar y mantener el proceso de ecodiseño como parte integral del diseño y desarrollo de sus productos. Durante el desarrollo de

estas actividades es necesario documentar los resultados, conclusiones y responsabilidades asignadas. La solución de diseño por la que se opte debería tratar de conseguir un equilibrio entre impactos ambientales, función, requisitos técnicos, calidad, desempeño, riesgos del negocio y aspectos económicos (UNE-EN ISO 14006).

Tras la definición de objetivos de la integración del ecodiseño, según la norma UNE-EN ISO 14006 la empresa debería realizar las siguientes fases durante el diseño y desarrollo de un producto concreto: 1) especificación de las funciones del producto, 2) definición de los parámetros ambientales significativos a partir del análisis de los requisitos ambientales de las partes interesadas, 3) identificar las estrategias pertinentes de mejora ambiental para el producto, 4) desarrollar metas ambientales basadas en las estrategias de mejora, 5) establecer una especificación de producto que incluya las metas ambientales y 6) desarrollar soluciones técnicas para cumplir las metas ambientales sin olvidar otras consideraciones del diseño.

Resumiendo, se puede concluir que el ecodiseño es el diseño de un producto por y para conseguir su desarrollo sostenible, tiene en cuenta todo el ciclo de vida y además trata de cumplir con las demandas y necesidades sociales. Por lo tanto, no se trata únicamente de minimizar los impactos negativos, también de aumentar los positivos en términos económicos, medio ambientales, sociales y éticos (Karlsson y Luttröpp, 2006).

1.3 Concepto de *cascading*

La Agencia Federal del Medio Ambiente alemana (UBA) define *cascading* como:

La estrategia de usar materias primas o los productos obtenidos de ellas en una secuencia cronológica de escalones de la manera más prolongada, asidua y eficiente posible, y únicamente recuperar la energía contenida en los materiales al final del ciclo de vida del producto. Está basado en la denominada "utilización en cascada" que fluye desde los niveles con más valor de la cadena hasta los niveles más bajos, aumentando la productividad de la materia prima. (Kosmol et al. 2012)

Desde la legislación europea se está promoviendo la utilización de los recursos en cascada, como la madera, que es considerada un recurso natural fundamental en el desarrollo de la bioeconomía circular. La Comisión Europea (2016) diferencia entre cascada de etapa única y cascada de múltiples etapas. El primer tipo de cascada se origina cuando un producto de madera, tras su vida útil es transformado y empleado con fines energéticos. El segundo tipo, antes de destinar la madera a fines energéticos, el material es aprovechado en otro producto.

El cambio de dinámica actual hacia una bioeconomía producirá -y está ya produciendo- un aumento de la demanda de los recursos renovables como la madera. Mantau et al (2010) predijo que, en la próxima década, la demanda

de madera sobrepasará la capacidad de suministro en los 27 Estados Miembros de la UE. Para afrontar la creciente demanda, la posibilidad de uso en cascada de la madera está siendo ampliamente discutida para aumentar la eficiencia de la materia prima. El empleo del mismo recurso en aplicaciones sucesivas, primero como material y por último como combustible, hace que el beneficio creado por una unidad de dicho recurso se multiplique (Höglmeier et al, 2014). Para la economía circular, que pretende que “el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía

durante el mayor tiempo posible, y en la que se reduzca al mínimo la generación de residuos” (Comisión Europea, 2015, p.2), es un aspecto importante.

Aunque el concepto de *cascading* va ganando relevancia, está aún muy poco extendido y estudiado. El procesamiento de los residuos de madera, actualmente se basa en el infra reciclaje, definido como el “reciclaje en el que el nuevo material tiene funcionalidad y calidad más baja que el original” (Risse et al. 2019). Esto supone la degradación de la madera en virutas, fibras o sustancias químicas. Para prolongar el ciclo de vida de un material, es de especial relevancia tratar de mantener sus propiedades intrínsecas de la mejor manera posible. Cada vez que se reducen las dimensiones del material, también disminuyen las posibilidades de reutilización y por tanto se restan posibles escalones en la cascada de uso. Es decir, cuanto mayor tiempo se logren mantener las características y dimensiones iniciales del producto, más valor se irá añadiendo a éste en la cascada (Teischinger y Kalcher, 2016).

Según la Comisión Europea (2016), del total de los residuos de madera que producen anualmente los estados miembros, el 70 % es reciclado. Dentro de este porcentaje, el 32% se emplea para producción de materiales como tableros, el 38% se aprovecha para generar energía y el 30 % restante se abandona en vertederos esperando su degradación natural.

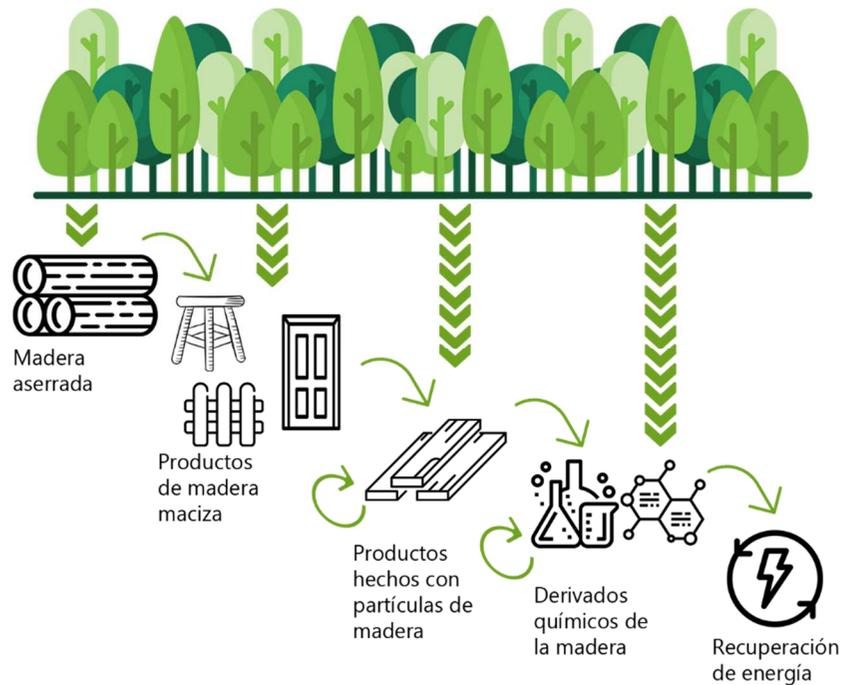


Fig. 8 Cascada de uso ideal.
Fuente: Elaboración propia basada en Thonemann y Schumann (2018).

El aumento de la utilización en cascada de los recursos forestales y los subproductos de madera y el reciclaje y reaprovechamiento de la madera proveniente de residuos de construcción antes de incinerarla, son algunas de las nuevas oportunidades relacionadas con la economía circular (Husgafvel et al, 2018).

La incineración final de la madera y de aquellos productos o residuos no aprovechables es totalmente necesaria como final de vida del material. Para maximizar los beneficios de los deshechos de madera y minimizar los impactos ambientales derivados, es necesaria una mejora en el reciclaje de la madera para clasificar las distintas piezas según sus posibilidades de reutilización.

Algunas de las ventajas medioambientales del uso en cascada de la madera con respecto al uso tradicional son:

- Se prolonga la retención de carbono en los productos de madera. El uso en cascada de la madera, normalmente tiene como último escalón la incineración, pero previamente esa madera de segunda mano puede emplearse de muchas otras formas (Fraanje, 1997). Al retrasar la incineración, se pospone también la emisión de CO₂ a la atmósfera.
- La extensión de bosques en Europa es limitada, aunque está aumentando rápidamente. El reaprovechamiento del material en

cascada permite obtener mayor eficiencia de cada metro cuadrado de bosque o explotación forestal (Sathre y Gustavsson, 2006). Esta es una de las principales ventajas, ya que el aumento de la producción de madera para abastecer la creciente demanda, actualmente está limitada por la superficie de bosque en Europa. Emplear la madera de nuevo con un uso material antes de su final de vida puede ayudar a evitar la escasez de madera en el futuro.

En el caso de España, la superficie forestal ocupa más de la mitad del territorio nacional, es el tercer país europeo con más superficie arbolada, únicamente detrás de Suecia y Finlandia. Además, entre 2000 y 2010, fue el país con mayor incremento de superficie forestal arbolada (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014). Sin embargo, a pesar de esta ventajosa situación, el aprovechamiento de la madera en las últimas décadas es muy escaso en relación con la disponibilidad. Las extracciones anuales de madera y leña suponen únicamente el 41% del crecimiento de los bosques españoles, porcentaje muy inferior a la media europea, que se sitúa en torno al 59%. Este bajo aprovechamiento de los recursos es claro signo de bajo nivel de gestión forestal activa. Una gestión forestal activa contribuiría a mejorar el estado de los bosques, reducir los riesgos de fenómenos catastróficos y propiciar el desarrollo rural. (Tolosana, 2016).

necesidad de minimizar las pérdidas en los ciclos para conservar la cantidad de madera de la manera más eficiente posible (Höglmeier et al., 2015). Para lograrlo se podría tratar de mejorar el rendimiento en las etapas de la extracción de la madera y su posterior procesado, y también perfeccionando la eficiencia de la industria maderera disminuyendo la cantidad de madera que se desperdicia, diseñando los cortes de manera que se aproveche más el material etc.

Otro de los aspectos para tener en cuenta a la hora de implementar un sistema de utilización en cascada es el tiempo. Y, por lo tanto, uno de sus principales objetivos es prolongar la duración de uso del material. De cada escalón se obtienen distintos productos en distintos periodos temporales, que pueden distar entre sí varias décadas. Esto significa que quizá el producto que se obtenga del segundo o tercer escalón de uso de una cantidad de madera que se pone hoy en día en circulación competirá en el mercado con otros productos muy diferentes a los actuales (Höglmeier et al., 2014).

En el informe de Teischinger y Kalcher (2016) se proponen cuatro posibles trayectorias de final de vida de los productos de madera, siguiendo un ciclo de uso de la materia prima en cascada previas a la incineración. En la Fig. 9 aparecen indicadas con números del uno al cuatro:

1. Reutilización directa: Reutilización de los productos de madera de una manera similar a su uso anterior tras un proceso de revisión y reparación.
2. Reconstrucción: El producto es desmontado por piezas, que se clasifican, transforman y reparan, y vuelven a entrar en el ciclo del producto como componentes semi-acabados o de fabricación.
3. Reelaboración: El producto también se desmonta por piezas que se clasifican. En este caso se reducen a elementos más pequeños que se incorporan en el ciclo de productos diferentes. Se introduce como materia prima para generar piezas de otros productos o incluso productos de madera maciza, de madera laminada, tableros de partículas o de fibras...
4. Regeneración de la materia prima: En esta vía de utilización, la madera usada se degrada para obtener sus principales componentes químicos útiles para la industria, como puede ser la celulosa, la hemicelulosa y la lignina.

Una vez definido el concepto de *cascading*, sus beneficios y las posibles trayectorias de los productos, parece necesario describir algunas posibles acciones específicas a nivel europeo que potenciarían la implementación de este sistema. La Comisión Europea (2016) enumera las siguientes:



Fig. 10 Residuos de obra en el contenedor.
Fuente: <https://www.contenedoressatur.com/blog/>



Fig. 11 Demolición de un edificio.
Fuente: <https://machemac.com/casi-la-mitad-de-los-residuos-de-construccion-y-demolicion-se-gestionan-de-manera-ilegal/>

- Desarrollar una normativa europea de clasificación de los residuos de madera.
- Hacer referencia explícita a la madera en la definición de residuos orgánicos y biodegradables tratados en la Economía Circular.
- Generar una plataforma para compartir las prácticas más eficientes de utilización de madera en cascada y vincularla a iniciativas existentes como la Asociación Europea para la Innovación (AEI).
- Apoyar y financiar la investigación específica sobre la utilización de la madera en cascada y su posterior aplicación y desarrollo industrial.
- Garantizar el uso eficiente de la madera y sus derivados como uno de los ejes centrales del desarrollo de la bioeconomía y la economía circular.

1.4 Posibilidades de reutilización de la madera en la construcción

Los residuos de construcción constituyen, en muchos países, la mayor fuente de obtención de madera ya usada, con un gran potencial para poder ser reutilizada. Los elementos de madera provenientes de la demolición de edificios poseen unas características óptimas para su reciclaje: el 60% son piezas intactas de madera maciza con secciones considerablemente grandes (Teischinger y Kalcher, 2016).

Las vigas de madera maciza y los suelos, puertas y rodapiés, son algunos de los elementos con mayores posibilidades de reciclaje en cascada. Muchos de estos, necesitan un tratamiento de la madera previo a su colocación y uso. Según Falk (1997), estos tratamientos, aplicados antes de la primera utilización de la madera, podrían restar durabilidad y resistencia a ataques biológicos en el nuevo uso tras la utilización.

Otro de los problemas que se presenta al intentar instaurar un reciclaje a partir de los residuos de demolición, es la dificultad de clasificación y separación de estos, ya que conforman una mezcla heterogénea (Fig. 10). Además, muchas veces la demolición implica la reducción del tamaño de los elementos al fracturarlos sin distinción o incluso su destrucción (Fig. 11) para agilizar el proceso de derrumbe y facilitar su transporte al vertedero. Por todo esto, el reciclaje de los distintos elementos de un edificio, y muy especialmente aquellos elementos de madera, necesita una importante variación en el proceso de demolición del edificio: soluciones como la deconstrucción orientada o demolición selectiva.

El proceso de deconstrucción del edificio consiste en el desmantelamiento selectivo o la retirada de ciertas partes o materiales previamente a la demolición del edificio (Falk, 1997). Se realiza en sentido inverso al proceso de construcción para tratar de retirar los elementos con potencial de reutilización de la manera más intacta posible.

La deconstrucción puede parecer, de primeras, altamente costosa. Sin embargo, Falk (1997) demuestra en primer lugar, que la mano de obra necesaria para llevar a cabo este desmantelamiento es competitiva con los costes de demolición, pero que, si además se tiene en cuenta el reembolso de dinero gracias a la posterior venta de los distintos materiales, sale bastante más rentable que la actual demolición. No obstante, también aporta beneficios medioambientales al reducirse el volumen de escombros mezclados y sin clasificar que acaba en los vertederos.

La cantidad de elementos aprovechables obtenidos de las deconstrucciones, depende muchas veces de las regulaciones existentes en cada país acerca de la actividad constructiva, los sistemas de vertederos, los edificios a derruir, la industria de la madera y derivados etc. Además de una situación legal favorable, hay gran cantidad de factores que influyen a la hora de decidir el final de vida de un producto de madera. Factores como el precio de recolección, las etapas de clasificación y procesado, la disponibilidad en ese momento de madera aserrada entre otros, afectan en gran medida en la viabilidad del reciclaje.

La deconstrucción, sin embargo, es en algunos casos bastante compleja y laboriosa e incluso necesita destruir o cortar ciertas partes de los elementos de madera para poder extraerlos del edificio. Por estos motivos, tratando de mejorar de cara al futuro estos aspectos, el reciclado ha de ser diseñado

conjuntamente con el producto. Es decir, tratar de tener en cuenta los posibles finales de vida del producto durante el proceso de desarrollo para facilitar un reciclado posterior competitivo.

Teischinger et al (2016) enumeran una serie de recomendaciones a tener en cuenta en el diseño de los elementos de construcción en madera para posteriormente maximizar y facilitar su reciclaje. Las clasifican en cuatro apartados: material, uniones, estructura y geometría.

– Material:

- Dentro de un mismo producto, minimizar el número de materiales distintos que se emplean.
- Evitar en la mayor medida las sustancias tóxicas como los protectores de madera.
- Escoger acabados y revestimientos sostenibles.
- Definir correctamente el tipo de material incluyendo la especie de madera, durabilidad, tratamiento dado...

– Uniones:

- Diseñar las uniones de manera que se puedan desensamblar fácilmente.
- Usar preferiblemente conectores mecánicos antes que químicos.
- Emplear la menor variedad posible de conectores.

- Escoger uniones clavadas preferiblemente sobre las roscadas.
- Colocar las uniones de manera lógica y sencilla para que puedan ser localizadas con facilidad posteriormente.

– Estructura:

- Ensamblar los diversos elementos de manera que puedan ser fácilmente sustituidos.
- Usar uniones estandarizadas.
- Separar la estructura de los otros sistemas constructivos.
- Realizar un diseño tal que todos los componentes estén accesibles.
- Diseñar una jerarquía de desmontaje teniendo en cuenta la durabilidad de los elementos.
- Identificar de manera permanente los puntos de desensamble.

– Geometría:

- Minimizar la variedad de componentes en términos de dimensiones y formas.
- Elegir secciones simples.

Desde la Comisión Europea (2015), dentro de las iniciativas de la “transición hacia una economía circular”, se comenta en múltiples ocasiones como desde el principio de vida del producto, existe un impacto ambiental del que hay

que tener conciencia. Es por ello que hace especial hincapié en la importancia del diseño, no sólo para conseguir productos de mayor calidad y durabilidad, si no para favorecer también su posterior reciclado, reutilización o reelaboración. Para incentivar a las empresas productoras a introducirse en estas dinámicas de economía circular, existen unos fondos financieros disponibles para aquellos que apuesten por la investigación y desarrollo de los productos pensando desde el principio en sus posibles finales de vida. A mayores, trata de promover el mercado de “materias primas secundarias” mediante la elaboración de normativas y certificados de calidad de las mismas, hasta ahora inexistentes. Por último, menciona la necesidad de un cuidado diseño de los productos de construcción, teniendo en cuenta que son productos pensados para tener una larga vida útil. Con esto se pretende no sólo reducir su impacto ambiental durante su ciclo de vida, sino también favorecer un segundo ciclo de vida mejorando su facilidad de reciclado. La madera como material de construcción podría tener especial implicación en estas directrices marcadas desde la Comisión.

Una iniciativa dentro de estos términos de la Universidad de Recursos Naturales y Ciencias de la Vida de Viena es el denominado sistema CaReWood. Es un proceso de reutilización de madera en cascada basado en la clasificación y el procesado de la madera recuperada de residuos de construcción para laminarla y emplearla en productos de madera laminada de cualquier tipo (Teischinger y Kalcher, 2016).

Según describen Risse et al (2019), en este proceso, la madera pasa por las siguientes fases (Fig. 12)

1. Recolección y transporte de la madera a la fábrica de procesado.
2. Clasificación manual y mediante dispositivos ópticos para la eliminación de las piezas excesivamente curvadas o gravemente dañadas.
3. Eliminación de impurezas como piezas metálicas o de plástico adheridas.
4. Limpieza mecánica de superficies para eliminar los acabados aplicados para el uso anterior. Laminado de las piezas con las características de sección requeridas.
5. Secado, si fuera necesario, para conseguir alrededor de un 13% de humedad propia de la pieza.
6. Encolado de las láminas para la fabricación del producto laminado. Unión longitudinal de piezas mediante *finger-joint*.
7. Distribución del producto

Por supuesto, todas aquellas partes desechadas en cada una de estas fases se envían a una planta para su incineración y obtención de energía.

Comparando los costes económicos y el impacto ambiental del reciclaje tradicional de los desechos de madera basado en la incineración y el sistema de reciclaje CaReWood, Risse et al (2019) concluye lo siguiente:

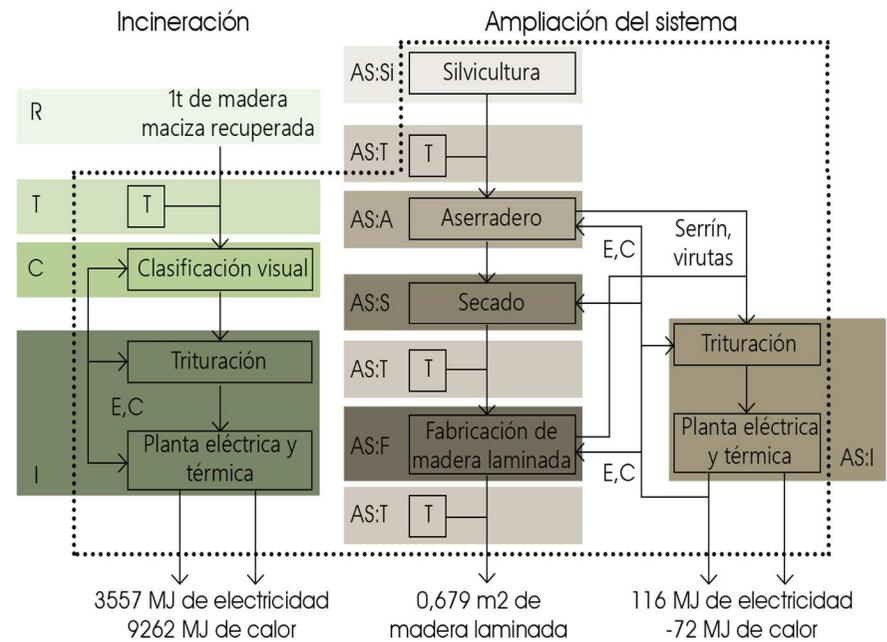
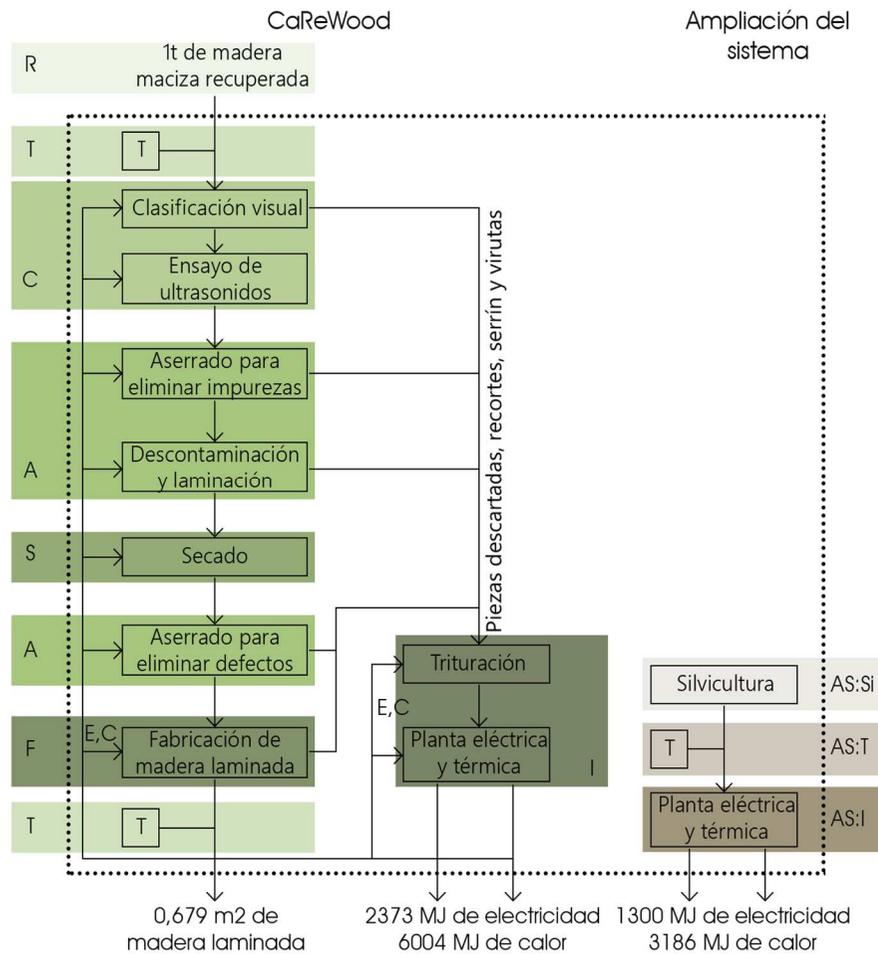


Fig. 12 Comparación del sistema CaReWood (izq) con el sistema convencional de reciclaje (dcha) partiendo de una tonelada de madera para reciclar.

R: madera maciza recuperada, T: transporte, C: clasificación, A: aserrado, S: secado, F: fabricación madera laminada, E: electricidad, C: calor, I: incineración, Si: silvicultura, AS: ampliación del sistema.

Fuente: Elaboración propia basada en Rise et al (2019).

El reciclaje de madera según el sistema CaReWood es entre un 1 y un 29 % más beneficioso en comparación con su directa incineración en términos medioambientales. Esto teniendo en cuenta que actualmente no se dispone del desarrollo tecnológico e industrial adecuado para esta nueva forma de reciclaje, presuponiendo que la situación mejorará la diferencia entre los sistemas se agrandaría aún más. Además, es económicamente viable, se estudian diversos escenarios posibles y en todos ellos da un valor añadido positivo a los productos obtenidos a partir de CaReWood. Tras realizar la media se obtiene alrededor de un 32% de reducción de costes con la

aplicación de este sistema. Por último, el análisis de eco-eficiencia también muestra valores de entre el 15 y el 150% más positivos en comparación con la directa incineración. Los procesos de encolado e incineración de los restos son claves para mejorar la viabilidad del sistema CaReWood en términos económicos y medioambientales. Es en estos campos donde hay más trabajo por realizar.

El sistema CaReWood puede formar parte de una de esas nuevas formas de reciclaje que se necesitan para el desarrollo de la bioeconomía circular en Europa: aumenta el periodo de uso de la materia prima, reduce el volumen de residuos en los vertederos y además contribuye a reducir la huella de carbono de los productos fabricados.

2 Los palés de madera

Sánchez López, Sánchez López y Arias Madero (2015) definen palé como “pequeño armazón creado para apilar y transportar cargas constituido por dos entramados separados por un elemento intermedio, que permite el levantamiento y manejo con pequeñas grúas hidráulicas, llamadas carretillas elevadoras o transpaletas, para la carga, el reagrupamiento y el apilamiento de mercancías” (p. 9)

Los palés han cobrado suma importancia en el sector del transporte de mercancías. Tras su utilización en la Segunda Guerra Mundial por el ejército de Estados Unidos, su uso se extendió globalmente. Estos elementos hacen más eficiente el transporte en términos económicos y de optimización de tiempo y espacio. Cada año en Estados Unidos se fabrican aproximadamente 500 millones de palés, que se añaden a los dos billones ya en circulación (Tornese et al, 2016). Por otro lado, en la Unión Europea se requieren alrededor de 280 millones de palés anualmente (Carrano et al, 2015). En 2015 la Asociación Europea del Palé fabricó alrededor de 74 millones de Euro-

pallet (Van Uffelen, 2017). Sin los palés, la mayor parte de los productos tendrían que ser apilados y cargados manualmente en cada medio de transporte, se incrementaría el costo de mano de obra o se necesitarían otros medios de carga y descarga más caros

El material más habitual en palés es la madera. El 90-95% del total de palés en circulación en el mundo se construyen con este material (Buehlmann et al, 2009). La preferencia por los palés de madera se debe al bajo precio de su materia prima, abundante en casi cualquier lugar del mundo, y su bajo coste de producción; es el palé más económico y sencillo de fabricar. En España los palés más generalizados son los de madera de pino, al ser una especie muy frecuente en todo el territorio peninsular. También se fabrican con madera de otras especies más resistentes, en función de las cargas a las que vaya a estar sometido.

A mayores de la madera, también se emplean otros materiales (Fig. 13) para fabricar palés que son:

- Fibras y virutas de madera.
- Plástico.
- Cartón.
- Metal.



Fig. 13 Tipos de palés según el material. Arriba: palé de madera. Abajo, de izquierda a derecha: palé de fibras y virutas de madera, palé de plástico, palé de cartón y palé metálico.

Fuente: Palé de madera: <https://es.epal-pallets.org/elementos-de-carga/medio-pale-epal-6>

Palé de virutas: <https://www.acaciatec.com/palet-logistica-necesitas-saber/>

Palé de plástico: <https://plasticpallets.com.au/store/plastic-pallets/light-weight-export-plastic-pallets/>

Palé de cartón: <https://espabox.es/productos/palets-de-carton/>

Palé metálico: <https://rackandshelf.com/product/material-handling-equipment/pallets/steel-pallets/>

Los tamaños estándar de palés varían entre los distintos continentes. En Asia el palé que más se utiliza mide de base 1100 x 1100 mm, en Europa el tamaño de palé estándar es de 1200 x 800 mm y se denomina Euro-pallet y en Estados Unidos emplean el de 1219 x 1016 mm, conocido como 48 x 40 pulgadas. La Organización Internacional de Normalización (ISO) recoge seis tamaños de palés: los tres anteriores más uno de 1067 x 1067 mm, otro de 1140 x 1140 y, por último, el de 1000 x 1200 mm, denominado isopallet o palé universal. Estas seis medidas son las aceptadas para el transporte intercontinental de mercancías. A pesar del esfuerzo por estandarizar las dimensiones de los palés, en Estados Unidos se emplean más de 400 tamaños y tipos distintos de palés. Esta falta de estandarización resta eficiencia a la vida del palé.

En el caso del Euro-Pallet, la norma UNE-EN 13698-1:2003 regula, además de las dimensiones de cada pieza, las tolerancias dimensionales (Fig. 9 y Tabla 1), los materiales, la carga nominal a soportar y la seguridad de las cargas en servicio, el modo de fabricación con los detalles de ensamblaje, y la inspección y marcado. El Euro-pallet, también llamado EUR-pallet o EPAL, está compuesto de 78 clavos, once tablas y nueve bloques, como ya se ha dicho mide 1200 x 800 mm y tiene una altura de 144 mm. Se puede enganchar por cualquiera de sus cuatro lados mediante una carretilla elevadora para ser relocalizado. En función de la humedad que contenga la madera, puede pesar entre 20 y 24 kg (Van Uffelen, 2017).

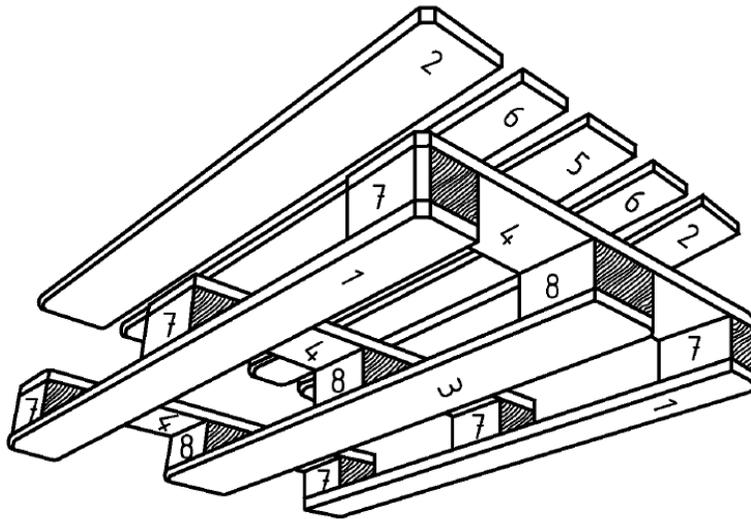


Fig. 14 Piezas de los elementos de una paleta de 800 mm x 1 200 mm.
Fuente: UNE-EN 13698-1:2003

Pieza	Elemento ¹⁾	Nº de elementos	Dimensiones para un 22% de contenido de humedad mm		
			Longitud	Anchura ²⁾	Espesor ²⁾
1	Tabla de entrada del piso inferior	2	1 200 ± 3	100 ± 3	22 ⁺² ₀
2	Tabla de entrada del piso superior	2	1 200 ± 3	145 ⁺⁵ ₋₃	22 ⁺² ₀
3	Tabla central del piso inferior	1	1 200 ± 3	145 ⁺⁵ ₋₃	22 ⁺² ₀
4	Tabla-travesa	3	800 ± 3	145 ⁺⁵ ₋₃	22 ⁺² ₀
5	Tabla central del piso superior	1	1 200 ± 3	145 ⁺⁵ ₋₃	22 ⁺² ₀
6	Tabla intermedia del piso superior	2	1 200 ± 3	100 ± 3	22 ⁺² ₀
7	Dado exterior en el patín de la paleta	6	145 ⁺⁵ ₋₃	100 ± 3	78 ⁺¹ ₀
8	Dado central en el patín de la paleta	3	145 ⁺⁵ ₋₃	145 ⁺⁵ ₋₃	78 ⁺¹ ₀
9	Fijaciones ³⁾				
10	Fijaciones ³⁾				
11	Fijaciones ³⁾				

Tabla 2 Dimensiones y tolerancias de los elementos de la paleta (UNE-EN 13698-1:2003).

Otra forma de clasificación de los palés es según la carga que vayan a soportar y la duración de vida útil para la que están diseñados. De esta manera obtenemos los tipos de la Tabla 1:

	Palés ligeros	Palés semiligeros	Palés pesados
<i>Espesor de planchas (mm)</i>	15-17	17-20	>20
<i>Cargas a transportar (kg)</i>	0-400	400-800	800-1500
<i>Uso</i>	Un solo uso	Uso limitado	Varias rotaciones

Tabla 1 Clasificación de los palés según sus características (Borrego Sánchez, 2015)

Los palés de madera destinados al transporte internacional han de cumplir la norma fitosanitaria NIMF-15. Con esta norma se pretende evitar la dispersión o introducción de plagas asociadas con el embalaje de madera. Normalmente se suele aplicar un tratamiento térmico y posteriormente se marca el palé con su origen y tipo de tratamiento aplicado.

A mayores de los tratamientos requeridos para cumplir con la norma NIMF-15, aunque es poco frecuente, se pueden aplicar pinturas, barnices y lasures, tratamientos de inmersiones en productos de protección, tratamientos en autoclave y tratamientos de protección frente al fuego.



Fig. 15 Palés apilados.
Fuente: <https://www.cadena88.com/es/consejos-y-trucos/todo-lo-que-quisiste-saber-sobre-los-pales>



Fig. 16 Transporte de palé mediante carretilla elevadora o transpaleta.
Fuente: <https://transpaleta.pro/>

2.1 Ciclo de vida de los palés de madera

La vida útil de un palé de madera está estimada en torno a los 6-7 años (Van Uffelen, 2017). Su ciclo de vida habitualmente consta de cinco fases: 1) Obtención de la materia prima, 2) fabricación, 3) transporte y 4) uso y reparación y 5) final de vida (Mazeika Bilbao et al, 2011). La vida de los palés puede considerarse como un ciclo cerrado o un ciclo abierto en función de la estrategia de gestión por la que se opte en la fase de utilización:

- Estrategia de ciclo abierto: la propiedad del palé se transfiere al usuario final cuando recibe el producto. En este modelo no se espera el retorno del palé al distribuidor una vez concluido su uso, tiene muchas posibilidades de acabar prematuramente su vida útil depositado en un vertedero en vez de ser de nuevo empleado hasta que se deteriore. La elección de esta estrategia se fundamenta en su bajo coste de adquisición, normalmente se emplean maderas baratas para la construcción de estos palés previstos para un único uso. Este sistema es muy poco sostenible a largo plazo y acaba produciendo un tremendo gasto de recursos.
- Estrategia de ciclo cerrado: los palés se recolectan una vez que la cadena de distribución ha concluido y, simultáneamente, se van incorporando nuevos palés a esta cadena según las necesidades. Las actividades relacionadas con la logística inversa y con la restauración

toman gran importancia en este caso. Cuando la recolección de palés la realizan empresas externas, se necesitan centros de devolución de palés donde se recojan para su inspección, limpieza, reparación, clasificación y devolución a la cadena de suministro. La madera utilizada para la construcción de estos palés es de mayor calidad y puede estar reforzada con partes metálicas o plásticas en vistas a una mayor durabilidad. En la Fig. 18 se muestra un posible flujo del movimiento de un palé a lo largo de su vida útil siguiendo un ciclo cerrado. El ciclo cerrado permite una recuperación y reutilización de los recursos y también facilita la gestión del final de vida de los palés.

Dentro de la estrategia de ciclo cerrado, las empresas manejan normalmente dos opciones que son: los programas de compra-venta de palés o los programas de alquiler. La primera opción consiste en la venta de palés del productor a la empresa que los necesite. Ésta los emplea repetidas ocasiones para el transporte de mercancía y posteriormente se encarga de retornar los palés una vez concluido el transporte. Cuando el palé se deteriora hasta el punto de no ser utilizable de forma segura, es recolectado por una empresa gestora de residuos que puede repararlos o reutilizar la madera para la fabricación de otros elementos o para producir energía (Carrano et al, 2015). En la opción de alquiler, las empresas no tienen la propiedad de los palés y contratan a terceros para que se encarguen de toda la gestión. Alquilan un

cierto número de ejemplares para tenerlos disponibles en todo momento a lo largo de la cadena de suministro. El precio de este servicio normalmente varía en función del tiempo que el palé va a estar en circulación y cuenta con una cuota adicional que cubre los costos de reparación, recolección y re inserción del palé a la cadena (Mazeika Bilbao et al, 2011). Esta opción fundamenta su éxito en una amplia red de puntos de recogida de palés que pueden pertenecer a la gestora, o ser empresas particulares contratadas en los puntos donde se concluya el transporte de mercancías (Carrano et al, 2015).

En la fase de restauración de los palés, según Tornese et al (2016) encontramos dos posibles opciones en función de dónde y cuándo se lleve a cabo la inspección de los mismos: *cross-docking* y *take-back*. La opción de *cross-docking* se caracteriza por realizar la inspección de los palés en el punto de recogida. De esta manera, los palés se clasifican según su estado y sólo se envían a reparar aquellos que lo necesiten o se retiran aquellos inservibles. En el caso del *take-back* todos los palés se envían de vuelta al punto de reparación, donde se lleva a cabo la inspección y clasificación de los mismos en las siguientes categorías: para reutilizar, reparar, desmontar y retirar (final de vida).

Los palés tienen varios escenarios de fin de vida, además de las mencionadas reutilización, reparación o reciclaje, también se puede proceder a su



Fig. 17 Cadena de montaje de palés de madera.
Fuente: <https://rotom.es/articulos/post/como-se-fabrican-los-palets-de-madera>



Fig. 19 Fabricación de palés de madera.
Fuente: <http://www.indupall.com.ar/>

incineración, con o sin recuperación de energía, o a su abandono en vertederos para su descomposición natural. Tal y como se ha comentado anteriormente, el abandono de estos elementos en vertederos está restringido, bien mediante su prohibición o bien por la imposición de tasas de gestión de residuos relativamente altas. Sin embargo, los palés siguen suponiendo alrededor del 5% del total de residuos almacenados en los vertederos de Estados Unidos (Carano et al, 2015).

La industria de reciclaje del palé recibe alrededor de 170 millones de palés cada año en Estados Unidos. El 80% se reparan y reutilizan, en cambio el 20% restante está demasiado dañado o no tiene un tamaño estandarizado, lo que hace más difícil su reparación. Es bastante habitual que este 20% de palés sea desensamblado para separar las partes reutilizables y darlas una segunda vida (Clarke, White y Araman, 2001). Las partes recuperadas pueden emplearse para combinarse entre ellas y fabricar un nuevo palé, o para sustituir partes de palés dañados. Para llevar a cabo cualquiera de las dos opciones es necesario realizar previamente una clasificación de la madera por especies o, al menos, separar madera de coníferas de la madera de frondosas. Esta clasificación se realiza para tratar de emplear maderas de semejantes características en el mismo palé. La Fig. 20 resume de manera gráfica y esquemática el ciclo de vida del palé con todas las opciones de cada fase comentadas en este apartado.

A pesar de que el reciclaje del palé está muy extendido y existe una industria creciente dedicada a ello, son los palés que acaban en los vertederos o entre la basura urbana los que ocasionan los mayores problemas. Cuando el palé está dentro de un ciclo cerrado de utilización, el reciclaje y reutilización vienen implícitos, pero, ¿qué pasa con aquellos que se emplean siguiendo un ciclo abierto y no aprovechan eficientemente la madera que contienen? Las opciones de estos palés son bastante limitadas (Klie, 2005) y todas conllevan

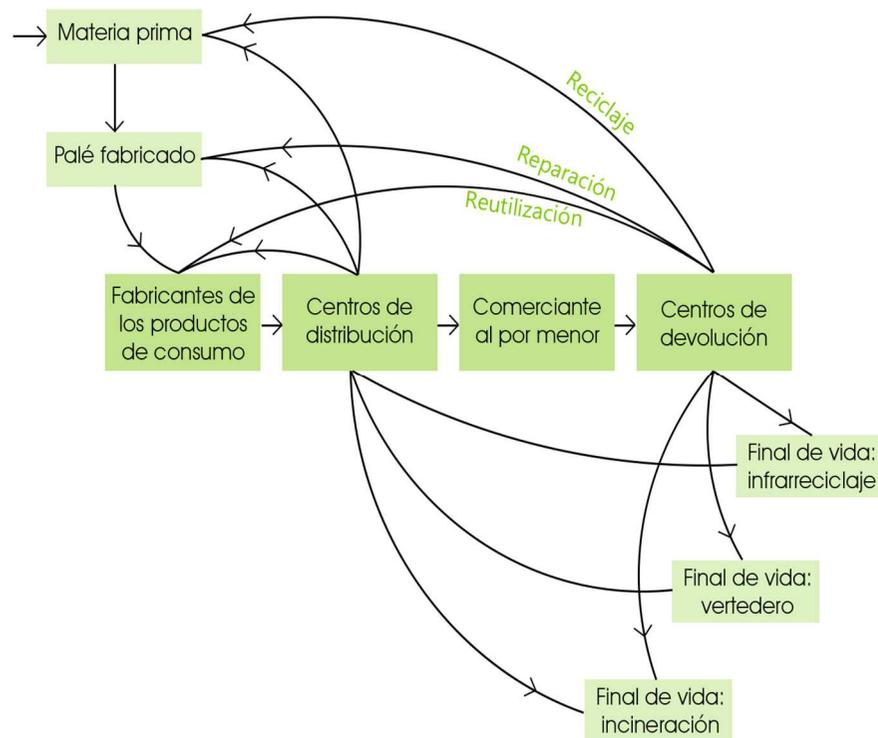


Fig. 20 Ciclo de vida de los palés.
Fuente: Elaboración propia basada en Carrano et al (2015).

a una degradación del material: quema con o sin recuperación de energía y trituración para la fabricación de tableros de partículas.

Teniendo en cuenta todas estas vías posibles dentro de la vida de un palé, se hace considerablemente difícil calcular la durabilidad de estos elementos y, por ello, también su impacto ambiental, que puede tener variaciones de más del 500% (Tornese et al, 2016).

La durabilidad inicial con la que se diseña el palé tiene mucho que ver con la forma de uso en la que se va a introducir (Carano et al, 2015). Según si está previsto para un ciclo abierto o cerrado se fabrica con un diseño estructural y un tipo de madera diferente. Otro de los factores a tener en cuenta son las condiciones de servicio a las que va a estar sometido.

2.2 La oportunidad de reciclaje de los palés de madera

La oportunidad que supone el reciclaje de los palés de madera se puede fundamentar en dos aspectos importantes: los palés son hoy en día un elemento indispensable para el comercio global y millones de palés se añaden cada año a la cadena de suministro global (Bhattacharjya y Kleine-Moellhoff, 2006). Es decir, son elementos totalmente imprescindibles para el comercio global actualmente y, dado que cada vez se mueven más mercancías, la fabricación de palés y el número de estos en circulación está



Fig. 21 Palés abandonados en un bosque.

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pallets_in_forest.jpg



Fig. 22 Fin de vida de los palés en el vertedero.

Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=Bmalv5PCq1o>

también al alza. El reciclaje de los palés supone también un reto para la escasez de recursos y para el uso sostenible de vertederos.

Según el estudio realizado por Araman et al (1998), 223 millones de palés se depositaron en los vertederos estadounidenses en 1995. Alrededor del 40% de ellos se recuperaron para su posterior reciclaje. Parece claro que los vertederos son una de las principales fuentes de obtención de palés usados. Estos residuos generan un gran problema de ocupación poco eficiente del espacio, lo que ha ocasionado la prohibición de acumulación de palés en vertederos de algunos estados como Carolina del Norte. En este estado se necesita recurrir a cualquier tipo de reciclaje (Buehlmann et al, 2009).

Los problemas que origina el abandono de palés en los vertederos hasta su degradación trasciende de la mera ocupación del espacio; también se trata de un uso ineficaz de los materiales. Este final de vida de la madera de palés supone una pérdida de energía. Además, la descomposición anaeróbica de la madera en ausencia de oxígeno produce metano, un indeseable gas invernadero (Carrano et al, 2015).

El planteamiento de soluciones de reciclaje para los palés necesita imprescindiblemente la realización de un análisis previo de la magnitud del problema y del tamaño de la oportunidad que supondría. Para ello convendría responder las siguientes preguntas: ¿Cuántos palés se depositan actualmente en los vertederos? ¿Cuánta madera de estos palés puede ser

recuperada? ¿Existe hoy en día algún programa de reciclaje en funcionamiento? Si existe, ¿qué productos se obtienen? ¿Está creciendo la tendencia al reciclaje de los palés? ¿Dentro del reciclaje, se están considerando opciones para revalorizar esa madera?

No se dispone de datos exactos actuales sobre la cantidad de palés que se desechan en vertederos; sin embargo, es conocida la creciente tendencia que existe hacia el reciclaje de los mismos. Ello no es algo novedoso, de hecho surgió en la década de los sesenta (Bush, Reddy y Araman, s.f.); sin embargo, existen diversos factores como el aumento de la preocupación por el medio ambiente, las ventajas económicas que obtienen los productores de palés al separar la madera aún utilizable de los palés desechados, los costes de vertedero pueden ser bastante altos y la concienciación pública sobre el límite de capacidad y el gasto económico que supone un vertedero entre otros, que han favorecido el creciente interés por el reciclaje de estos elementos en los últimos años (Araman et al, 1998).

Los palés son elementos atractivos de reciclar debido a:

- La gran cantidad de palés disponible en todo el mundo, que supone extensas cantidades de madera. Aunque no se dispone de datos de la madera apta para ser recuperada una vez finalizado el ciclo de vida de los palés, los números de la madera consumida para su fabricación pueden dar una idea de la magnitud de materia prima

disponible para el reciclaje de estos elementos. En Estados Unidos, tradicionalmente, la industria de fabricación de palés era la máxima consumidora de madera aserrada, agotando entre el 33 y el 50% de toda la madera aserrada disponible cada año (Carrano et al, 2015). La mayoría de estos palés se emplean un número escaso de veces terminando mucho antes de lo previsto su vida útil (Buehlmann et al, 2009).

- La estandarización. La gran mayoría de palés en circulación cumplen las dimensiones estándar aceptadas por las normas ISO. Gracias a esto se obtienen gran cantidad de piezas de tamaños iguales que facilitan el reciclaje.
- Su fácil desensamblaje y la posibilidad de reutilización de todas sus partes. La norma ISO a mayores de la regulación del tamaño de los palés, fijan el modo de ensamblaje. De nuevo, gracias a la estandarización se facilita la creación de cadenas de desensamblaje de los palés de las mismas dimensiones para la obtención de las distintas partes
- Bajo coste del producto. Un Euro-palé nuevo tiene un precio de entre 8-10 euros. Los palés ya usados que se compran para su reciclaje se suelen pagar en torno a 2-3 euros (Klie, 2005).



Fig. 23 Palés abandonados en entornos urbanos.

Fuente: [https://www.eyem.com/search/pictures/Pallets?marketScore\[\]=great&marketStatus=commercial&page=4&q=Pallets&replaceQuery=true&sort=relevance](https://www.eyem.com/search/pictures/Pallets?marketScore[]=great&marketStatus=commercial&page=4&q=Pallets&replaceQuery=true&sort=relevance)



Fig. 24 Palé abandonado.

Fuente: Elaboración propia.

- La recolección de los palés es relativamente sencilla ya que normalmente se acumulan en áreas urbanas (Bush, Reddy y Araman, s.f.).
- Su interés estético. Estos elementos se han convertido en atractivos para arquitectos, decoradores y artistas debido a su apariencia pura de materia natural, la estandarización en contraposición con la gran variedad de texturas que tienen sus superficies, su peculiar representación del paso del tiempo observada en el deterioro de las piezas y las marcas de uso que aparecen en estas, la variación natural de la madera, etc. Los palés en la industria se conciben como un conjunto de elementos todos iguales gracias a la estandarización, pero, tras su vida útil cada elemento se diferencia del conjunto por todos los aspectos comentados (Van Uffelen, 2017).

Todas estas razones han hecho que en las últimas décadas la industria de reciclaje del palé no haya parado de crecer. Pero, a pesar de esta buena dinámica existente, parece pertinente una investigación más exhaustiva sobre las formas de reciclaje de la madera que se obtiene de los palés: actualmente el reciclaje se basa en una degradación del material bien triturándolo o incinerándolo. Las opciones siguen siendo bastante limitadas y con poca valorización de la madera. Teniendo en cuenta el aumento en la demanda de productos de madera en la construcción que se está experimentado en

los últimos años, podría ser un buen momento para fomentar la investigación sobre la valorización de este tipo de residuo tan común.

3 Añadir un escalón más: posibilidades de reutilización de los palés como material de construcción

La industria de la fabricación de palés y demás materiales de embalaje ya tiene un sistema bastante desarrollado de reutilización y reciclaje, generando ciclos cerrados de vida de la materia prima dentro de este sector, y terminando con un infra reciclaje de la madera al triturarla. Husgafvel et al (2018) considera el reaprovechamiento de la madera de los palés una de las oportunidades más prometedoras para la reutilización de la madera en cascada. El concepto de reutilización en cascada explicado anteriormente en el apartado "1.3 Concepto de *cascading*" de este trabajo, que consistía en prolongar la vida útil de un recurso o material mediante escalones de uso para ganar en eficiencia y minimizar el impacto ambiental, es perfectamente aplicable a los palés. De este producto se obtiene madera limpia y en bastante buen estado que puede ensamblarse mediante *finger-joint* para

3. POSIBILIDADES DE REUTILIZACIÓN DE LOS PALÉS

conseguir productos de mayor calidad y así revalorizar la materia prima. En Estados Unidos ya existe una vía de reciclaje de palés de madera para la producción de materiales de construcción que mueve anualmente alrededor de 3,5 billones de dólares (Klie, 2005).

En realidad, los palés utilizados dentro de un ciclo cerrado ya se emplean en cascada, pues se produce una "reutilización" directa al reinsertarlos a la cadena de suministro y una "reconstrucción" al repararlos usando las partes aprovechables de los dañados. Por el contrario, los palés empleados según el ciclo abierto o aquellos desechados tras varios ciclos de uso podrían también seguir sumando escalones a la vida útil de la madera que contienen antes de ser incinerados, triturados o abandonados para su descomposición en vertederos. Las opciones para estos palés pueden extenderse fuera de su reutilización y reaprovechamiento en el sector del transporte de mercancías y dar un salto al sector de la construcción. Sería conveniente que este salto no implicara la trituración del material o que, al menos, tratara de mantener sus propiedades físicas en la mayor medida posible para poder prolongar aún más la vida útil de la madera y realmente añadir un escalón de utilización más. Con esto se conseguiría generar una cascada de múltiples etapas.

Los sistemas constructivos son, ahora que se ha minimizado el impacto de la etapa de uso del edificio, unos de los elementos con mayor impacto ambiental. El empleo de sistemas que utilicen materiales de una manera más



Fig. 25 Pallet Theater in Dublin. Seán Harrington Architects
Fuente: <https://thedonkeyshindlegs.com/2013/09/22/little-upstarts/>



Fig. 26 Desert Observatory. S-AR.
Fuente: <https://www.designboom.com/architecture/s-ar-stacion-arquitectura-desert-observatory-nuevo-leon-mexico-06-29-2015/>

eficiente ayudaría a mitigar este impacto. Parece por esto interesante promover la investigación en la utilización de la madera en cascada y, por qué no, la madera de los palés que, como se ha expuesto anteriormente abarca enormes cantidades de materia prima. De hecho, la Comisión Europea (2016) se comprometió a apoyar y financiar la investigación específica sobre la utilización de madera en cascada y su posterior aplicación y desarrollo industrial.

La reutilización de los palés en la construcción puede seguir tres vías, de las propuestas por Teischinger y Kalcher (2016): la reutilización directa, empleando el palé como elemento o como estructura en sí mismo, la reelaboración, escogiendo las partes aprovechables del palé para fabricar otros materiales constructivos como pueden los productos laminados, y la regeneración de la materia prima, triturando el palé para obtener tableros derivados de la madera.

3.1 REUTILIZACIÓN DIRECTA: Empleo del palé como material de construcción

El ecodiseño, desarrollado en el apartado 1.2 del presente trabajo, es una nueva disciplina dentro del diseño tanto industrial como arquitectónico que está tomando enorme relevancia en nuestros días. Se trata de realizar una

producción más sostenible y un consumo más eficiente de los recursos. En estos términos, el palé como material en sí mismo, ha ido ganando importancia debido a su constitución, versatilidad y economía. Su morfología y cualidades ofrecen un amplio abanico de posibilidades para unirlo y combinarlo. Ensamblado y arriostrado correctamente o en combinación con elementos estructurales auxiliares puede dar lugar a pequeñas construcciones (Sánchez López, Sánchez López y Arias Madero, 2015).

El interés por el palé como elemento arquitectónico y decorativo no es algo actual, aunque no ha sido hasta estos últimos años cuando realmente ha experimentado un auge en su reutilización en nuevos sectores distantes del sector del transporte y embalaje. Este auge viene en parte fomentado por la mayor relevancia que está tomando el reciclaje en nuestras vidas. La imaginación humana, fuente inagotable de experimentación, ha encontrado múltiples formas de reciclaje para este peculiar elemento de fácil manejo y rápida ejecución que constituye una estructura en sí mismo.

El reciclaje de palés trata de diseñar creaciones que empleen los componentes estandarizados, cuyo tamaño permite su manejo y montaje por una sola persona. Los productos realizados a partir de este proceso de reciclaje se caracterizan por la imperfección de su acabado, pues es como se concibió el palé cuando se fabricó para su uso en el transporte de mercancías (Van Uffelen, 2017).

En el mundo de la arquitectura, los componentes estandarizados siempre han sido objeto de reutilización. Un ejemplo claro es el ladrillo romano, reutilizado en épocas de escasez de manera casi infinita obteniendo acabados muy diferentes entre sí. Este elemento tan simple, mediante su rotación en distintas posiciones crea una gran cantidad de variaciones. La relación entre simpleza del elemento y multiplicidad de opciones constructivas también se puede aplicar a los palés.

Sánchez López, Sánchez López y Arias madero diferencian dos técnicas fundamentales en la construcción con palés:

- Apilamiento de palés (Fig. 25). Consiste en superponer capas de palés sobre otras generando una superficie horizontal. Los palés son sujetos entre sí mediante pequeños elementos que impidan su desplazamiento como bridas o tirafondos. La imagen visual que se obtiene tiene un aspecto masivo. Los palés que constituyen los muros actúan como ladrillos que se aparejan y definen el ancho. Normalmente, para este sistema constructivo, se escoge el palé europeo por su gran capacidad de carga.
- Ensamblaje de palés (Fig. 26). Los palés en sí conforman una estructura ligera a modo de *balloon-frame*. Al colocarlos de manera perpendicular entre sí el conjunto adquiere estabilidad. Los palés que se emplean en este caso son los que tienen las tablas unidas



Fig. 27 Silla perteneciente a The Pallet Project.
Fuente: <https://www.upcycledzine.com/the-pallet-project-minimalistic-pallet-wood-design-by-studiomama/>



Fig. 28 Sofá de palés de Pierro Cerrati.
Fuente: <https://www.coroflot.com/pierout/Pallet-Couch>

mediante largueros; tienen menor capacidad de carga, pero a cambio son más ligeros. En general esta técnica necesita de elementos auxiliares para hacer las uniones e incluso para configurar la estructura portante.

El palé en la construcción, aunque últimamente esté ganando popularidad, sigue siendo un campo bastante poco explorado, de hecho, se le suele ligar únicamente a arquitecturas efímeras o elementos decorativos y muebles, sin profundizar mucho más en sus posibilidades. La arquitectura actual, en conjunto con el ecodiseño, está evolucionando hacia la sostenibilidad y reutilización de elementos y materiales reciclados que puedan ser empleados en la construcción. Es por ello que a continuación se muestran una selección de los innumerables usos que se le puede dar al palé como elemento constructivo en sí mismo, incluyendo ejemplos reales que se han obtenido principalmente de los libros *Building with pallets. Pallet Project* y *Remodeled, reused, recycled. Pallets 3.0 Architecture+Design*.

3.1.1 Mobiliario

La madera de palé aparece como un material ideal para el diseño personalizado de muebles. Su principal característica es la economía y la versatilidad del material. No son únicamente "aficionados" del bricolaje los que experimentan con este material creando tantas opciones de mobiliario

como la imaginación les permita, también algunos diseñadores se han introducido en este interesante campo de experimentación.

Algunos creadores conciben este tipo de diseño desde una perspectiva asequible tanto económicamente como de facilidad de montaje. Es el caso de The Pallet Project, una iniciativa llevada a cabo por una serie de diseñadores londinenses que tenían como objetivo principal aplicar aspectos medioambientales y de sostenibilidad al campo del diseño. Son las instrucciones de montaje lo que se vende de este proyecto para que cada uno pueda aplicar materiales asequibles que encuentre en su zona. Los diseños comprenden desde sillas de distintos tamaños (Fig. 27) hasta lámparas, abogando siempre por la funcionalidad.

Otro ejemplo viene de la mano de un arquitecto milanés, Piero Ceratti, que decidió usar palés para diseñar un sofá (Fig. 28) tras darse cuenta de que estos elementos eran normalmente abandonados sin estar rotos y que por tanto era muy sencillo adquirirlos. Los palés son atados con una cuerda para sujetarlos y mediante un tablero de madera se crea el respaldo. Añadiendo cojines se aporta comodidad al diseño que aparece como una silla reclinable. De nuevo la simplicidad del diseño es la característica principal de este mueble.

3. POSIBILIDADES DE REUTILIZACIÓN DE LOS PALÉS

3.1.2 Interiorismo

La madera es un material desde siempre muy utilizado para la decoración interior. Aporta unas características estéticas inigualables con su variedad de color, texturas y acabados que, junto con su higroscopía, generan un ambiente cálido y acogedor. Con los palés a mayores se consigue un aspecto industrial con un toque alternativo, fresco e innovador. Su fácil y rápido montaje lo hace ideal para decorar locales con poco presupuesto y con posibilidad de variaciones futuras o renovación. La ventaja de esta aplicación es que, al estar en un interior, la madera del palé a penas sufre, al no estar expuesta a las variaciones climatológicas.

El Restaurante Las Delicias, situado en Véjer (Fig. 29), emplea el palé europeo como elemento principal en el proyecto de rehabilitación y cambio de uso de un antiguo teatro. Realizado por el diseñador Gaspar Sobrino, transforma un edificio del año 1840 en un restaurante, bar de copas y sala de conciertos. Los palés se emplean como trasdosado de los muros para dar uniformidad al espacio interior que, además, en ciertos puntos tienen función de estanterías. El falso techo también está formado por estos elementos que se sujetan atornillados en una subestructura metálica, formando una bóveda. Todo el mobiliario del restaurante también está realizado combinando materiales reciclados.



Fig. 29 Restaurante Las Delicias, Véjer. Gaspar Sobrino.
Fuente: <http://www.lasdeliciasvejer.com/>

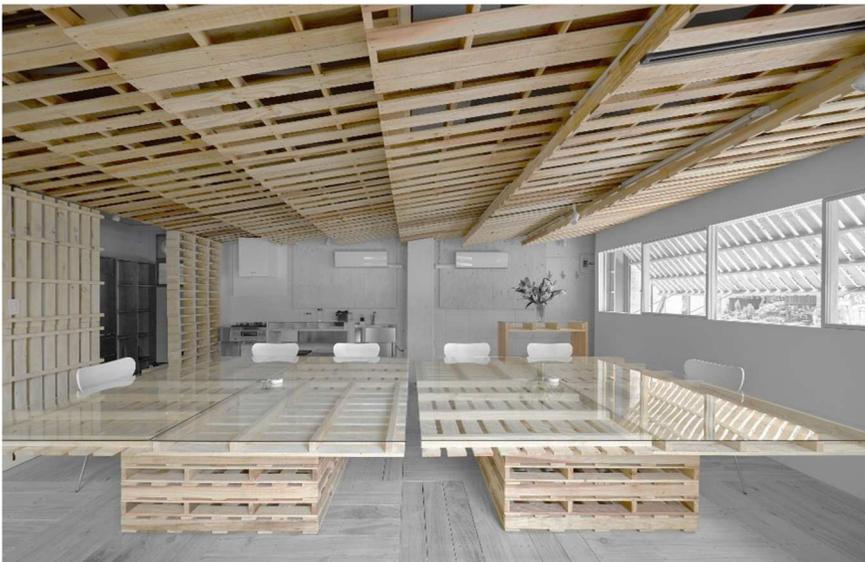


Fig. 30 Palette with flap Shutters, Tokio.
Fuente: : <https://architizer.com/projects/palette-with-flap-shutters/>

El proyecto de interiorismo *Palette with flap Shutters* (Fig. 30) necesitaba encontrar una solución de decoración barata debido a la condición de temporalidad en la que estaba arrendado el local. Se emplearon 130 palés de madera con los que se construyó el suelo, las particiones, el techo y los muebles de esta oficina situada en Tokio. La decoración con palés generó un espacio versátil que no solo se usó como oficina sino también como espacio para albergar pequeños eventos e incluso como tienda. Al emplear palés como elemento principal, no hubo necesidad de contratar carpinteros profesionales por lo que se redujeron considerablemente los costos de construcción. La redecoración completa del local incluyendo mobiliario tuvo un costo final de solo 1500 libras.

3.1.3 Construcciones efímeras

La posibilidad de desmontaje y reutilización sin dejar huella hace de los palés un material ideal para las construcciones efímeras como pabellones, escenarios o instalaciones. Tiene la desventaja del deterioro de la madera al estar expuesta al exterior, aunque su carácter temporal resta importancia a esta desventaja.

El grupo Palet Project creó en 2013 una torre de cinco metros de altura en Covarrubias (Burgos) con motivo del Festival Internacional de Arte y Construcción (IFAC-2013). Durante este festival se realizó un taller de construcción con palés de madera del que surgió esta torre de iguales

3. POSIBILIDADES DE REUTILIZACIÓN DE LOS PALÉS



Fig. 31 Torre para el IFAC-2013 en Covarrubias. Grupo Palet Project.
Fuente: <https://divisare.com/projects/391020-buho-arquitectos-urracas-tower-2-0>



Fig. 32 Escenario Treeline. Pickathon 2014, Oregón.
Fuente: <https://pickathon.com/2015/04/watch-now-the-story-of-the-tree-line-stage/>

proporciones que el Torreón de Doña Urraca (Fig. 31). La torre contiene un pórtico interior y se apoya sobre un pavimento perimetral con un banco. La construcción de la torre fue realizada por un grupo internacional de estudiantes de arquitectura, participantes del festival, utilizando únicamente palés y tirafondos de acero. Se emplearon 20 palés europeos para formar la base y a continuación palés americanos para generar los anillos de la torre. Para finalizar la construcción se introdujeron tres focos en el interior para que, por las noches, apareciera como un farol de mimbre en el medio de la plaza.

Algunos alumnos de la escuela de arquitectura de la Universidad Portland State, con la colaboración de profesores, diseñaron en 2014 el escenario Treeline (Fig. 32) para el Festival de música Pickathon que se celebra todos los años en Happy Valley, Oregón. La experimentación con palés para la construcción encaja perfectamente con el espíritu de innovación en busca de la sostenibilidad que caracteriza al evento. Se necesitaron 520 palés para configurar un espacio en el que la irregularidad de la topografía y la homogeneidad de la estandarización entraron en sintonía. Para configurar el suelo y las gradas se dispusieron palés apilados mientras que para crear un fondo escénico se ensamblaron palés en zigzag aportando dinamismo al conjunto.



Fig. 33 Pallet House. Estudio I-beam

Fuente: <https://www.i-beamdesign.com/new-york-humanitarian-projects-design>



Fig. 34 Sistema Emergency Floor. Sam Brisidine y Scott Key

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/769437/emergency-floor-una-solucion-constructiva-para-refugiados-de-todo-el-mundo>

3.1.4 Refugios

En épocas como la actual en la que los refugiados copan las noticias diarias, son muchas las propuestas para dignificar la vida de estas personas que pueden pasar hasta 40 años viviendo en tiendas de campaña. En estas situaciones de pobreza y necesidad, los materiales empleados tienen que ser baratos y de rápida y fácil construcción, tres características que los palés cumplen a la perfección. Mediante palés se puede acotar un espacio vividero básico y dar cierta protección a sus ocupantes.

En estos términos surge el prototipo Pallet House del estudio I-Beam (Fig. 33). Se trata de una vivienda modular, prefabricada y respetuosa con el medio ambiente, que surgió como un refugio de transición para los refugiados que regresaban a Kosovo. La peculiaridad de este prototipo es la posibilidad de transformación de vivienda temporal a hogar permanente mediante la utilización de materiales del entorno como piedra, barro, madera, metal, plásticos ... con los que rellenar los huecos de las paredes y cubierta. La amplia variedad de materiales a combinar con la estructura de palés hace que este prototipo se adapte fácilmente a cualquier clima de la tierra. Además, el levantamiento de la estructura básica de palés tiene una duración estimada de menos de una semana.

EfimerARQ es un grupo de arquitectos vallisoletanos que ha desarrollado un sistema constructivo con palés que no precisa ningún elemento estructural

adicional o conectores específicos. Esta es precisamente su principal aportación, no necesitan tecnología complementaria para realizar construcciones, lo que hace este sistema ideal en situaciones de precariedad y emergencia. Este sistema se denomina el Sistema Valladolid. Con él se pueden crear superficies con capacidad estructural y muy bajo coste, lo que abre un enorme campo de aplicaciones tanto en rehabilitación – cerramientos, tabiquería, altillos, forjados sanitarios...- como en nueva construcción; sobre todo para casos de emergencia –refugios-. Esta última aplicación es desarrollada por este equipo diseñando módulos y diferentes sistemas de agregación para conformar variaciones en los tipos de viviendas según las necesidades requeridas (Arias et al, 2014).

Además de la necesidad de una cubierta para protección de las inclemencias del tiempo, otro de los grandes problemas de los campos de refugiados es la falta de higiene por la inexistencia de un suelo limpio y seco donde asentarse. Precisamente, el suelo es una de las mayores fuentes de infecciones y de propagación de estas. El sistema Emergency Floor (Fig. 34), diseñado por Sam Brisidine y Scott Key, surge como solución asequible a este problema: los palés y plataformas empleadas para el transporte del material de ayuda humanitaria se coloca como base sobre la que se dispone un pavimento. De esta manera se separa el pavimento del terreno evitando problemas de infecciones, disminuyendo la humedad y mejorando las condiciones de higiene de los habitantes (Borrego Sánchez, 2015).

3. POSIBILIDADES DE REUTILIZACIÓN DE LOS PALÉS

3.1.5 Fachadas ventiladas

Uno de los campos más activos de innovación en arquitectura es la arquitectura bioclimática. Consiste en el diseño de edificios teniendo en cuenta las condiciones climáticas, aprovechando los recursos disponibles (sol, vegetación, lluvia, vientos) para disminuir los impactos ambientales, e intentando reducir los consumos de energía (Sánchez-Montañés Macías, 2020).

En este sentido, la introducción de palés como sistema de fachada ventilada funcionan controlando la radiación solar que incide en la fachada. Los palés se colocan como capa exterior, a modo de celosía, pero son el resto de capas las que proporcionan estanquidad al edificio. En verano, la capa de palés aporta sombra a la fachada y permite su aireación al crearse una corriente de aire que atraviesa las tablas. En invierno, los palés se abaten para abrirse y permitir la absorción del calor de la radiación solar y transmitirlo al interior.

La casa Manifesto (Fig. 35), diseñada por James & Mau en Chile, lleva el reciclaje de materiales en la construcción a su máximo nivel: como estructura se emplean tres contenedores marítimos reutilizados, que se aíslan e impermeabilizan para convertirlos en vivideros, a los que se añade un sistema de celosía colgando palés. El sistema de cuelgue de los palés en los contenedores está previsto para que la casa “se vista y se desvista”, según la época del año. El diseño modular que aportan los contenedores permite



Fig. 35 Casa Manifiesto, Chile. James & Mau
Fuente: <https://veredes.es/blog/casa-manifiesto-infiniski-manifesto-house-jamesmau/>



Fig. 36 Proyecto Slumtube, Johannesburgo.
<https://inhabitat.com/slumtube-affordable-housing-made-from-shipping-pallets/slumtube-3/>

futuras modificaciones, pudiendo ampliar la casa a posteriori según las necesidades del cliente. El 85% de los materiales empleados en la construcción de esta casa provienen del reciclaje y la reutilización. Además, tiene un diseño consciente de las orientaciones asegurando la correcta iluminación, ventilación y acondicionamiento de la casa, apoyándose en sistemas naturales.

3.1.6 Cerramientos

La combinación de los palés con otros materiales como tierra, plásticos o chapas metálicas consigue generar sistemas para resolver aquellas arquitecturas que necesitan una mayor protección a la intemperie, impermeabilidad, mejorar la capacidad aislante de la envolvente, etc. La combinación de la tierra con los palés, por ejemplo, no deja de ser una renovación del sistema tradicional de entramado de madera y barro, aún existente en los entornos rurales españoles.

El proyecto Slumtube (Fig. 36) surge de la idea de crear un edificio que se pudiera construir fácilmente a mano en un corto periodo de tiempo y adaptado a las condiciones de Johannesburgo. Los palés tienen una función estructural, buscando abaratar costes, ya que en África las estructuras de madera son considerablemente caras. El material aislante se elige teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona, y es por eso que se emplean materiales como paja y barro. A mayores, se colocan planchas metálicas en



Fig. 37 Casa Jacinta, Chile. Estudio Maucobiitectura
Fuente: Sánchez López, Sánchez López y Arias Madero (2015).



Fig. 38 Edificio de oficinas Glyfada Pallet.
Fuente: <https://www.thegreekfoundation.com/architecture/pallet-offices-store-klab-architecture>

la cubierta. Los objetivos principales de los arquitectos eran intercambiar conocimientos sobre buenas prácticas constructivas con los lugareños y tener siempre en mente la parte financiera del proyecto. El edificio, dividido en dos secciones, se construyó en tres meses sin necesidad de ningún tipo de maquinaria y contiene un espacio de salón y comedor por un lado y, en el otro, los espacios de aseos y dormitorio.

La Casa Jacinta (Fig. 37), situada en la costa chilena, es un proyecto realizado por el estudio Maucobiitectura que combina los palés, el barro y el mortero de cal para configurar los cerramientos de la vivienda. Esta vivienda, con profundos conceptos de reciclaje, no revela en ningún momento la existencia de palés en sus muros. Su estructura se compone de pilares de madera entre los que se colocan los palés rellenos de barro y paja que aportan una gran inercia térmica al edificio. Al exterior se enfosca con un mortero de cal para proporcionar estanqueidad y al interior se coloca una malla metálica para dar agarre a un mortero de barro, sobre el que se aplica un mortero de yeso más fino. La estructura de los forjados se realiza mediante viguetas de madera apoyadas en una viga perimetral que recorre todos los pilares.

En el caso del edificio de oficinas Glyfada Pallet (Fig. 38), se aprovechó un edificio a medio construir, parado por muchos años, para aportar a la estructura existente una nueva identidad empleando materiales naturales y ecológicos. Los palés fueron seleccionados como material principal por su



Fig. 39 Pabellón Palettenhaus.

Fuente: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/hdz/projekte/alles-palette-entwicklung-des-palettenhauses-zur-serienreife.php>



Fig. 40 Pabellón Palettenhaus por el interior.

Fuente: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/hdz/projekte/alles-palette-entwicklung-des-palettenhauses-zur-serienreife.php>

bajo coste. En las fachadas suroeste, oeste y noroeste, los palés conforman la capa exterior de la fachada generando un sistema pasivo de refrigeración. La capa interior es una envolvente de vidrio y entre estas dos capas se encuentra la subestructura metálica que sostiene los palés que, además, hace de cámara de aire. Los palés son abatibles, de manera que se pueda regular la entrada de luz.

3.1.7 Estructuras

Existen diversos tipos de sistemas constructivos para generar estructuras mediante palés. Se diferencian entre ellos según si el palé ejerce la función resistente y el tipo de elementos auxiliares que necesita para conformar la estructura –ya que los palés por sí solos no suelen ser capaces de alcanzar unas condiciones de estabilidad adecuada-.

Por un lado, encontramos el tipo de construcciones realizadas exclusivamente con palés, tablas de palés y tirafondos. Por otro, están las estructuras que incluyen elementos metálicos en las uniones para ensamblar los palés y aportar estabilidad y rigidez a la construcción. En último lugar tenemos las estructuras ya comentadas en el apartado anterior “Cerramientos”, que no son propiamente estructuras de palés: la estructura la conforman elementos estructurales de un material cualquiera. El palé carece de función portante y ejerce de recubrimiento, rellenando los huecos entre dichos elementos estructurales.

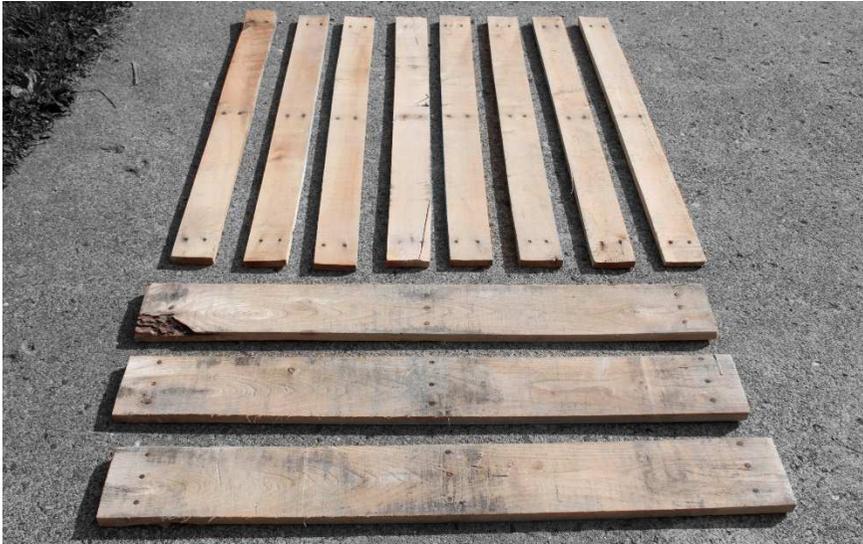


Fig. 41 Tablas desensambladas de un palé de madera.

Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/107945722290962387/>



Fig. 42 Sistema constructivo de entramado ligero de madera.

Fuente:

https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_desarrollo_foresto_industrial/madera_y_construccion/sistema-entramado/

El pabellón Palettenhaus se presentó en la Bienal de Venecia del 2008 (Fig. 39) como un prototipo de vivienda modular sostenible, económica y de rápida construcción. Para su construcción se emplean los palés de 1200 x 800 mm, generando una doble envolvente en las fachadas, suelo y cubierta. La capa exterior de palés tiene una función de recubrimiento y la interior alberga la estructura; entre medias de las dos capas se coloca la impermeabilización, el aislamiento y las instalaciones. Todo ello queda oculto para que el acabado exterior e interior sea de palés (Fig. 40). La estructura tiene una configuración de tubo en la que las dos fachadas longitudinales hacen de muro de carga sobre los que se apoyan las vigas que sostienen el forjado de cubierta. En este caso, los palés hacen de bovedillas. El forjado de suelo se eleva del terreno para permitir la aireación y evitar humedades.

3.2 REELABORACIÓN: Reaprovechamiento de los elementos del palé para generar materiales de construcción

La estandarización de los palés ha conseguido que gran cantidad de las piezas que los componen sean de iguales dimensiones y que además estén unidas de la misma manera. Estandarización e industria son dos términos que convenientemente han de ir unidos, ya que el primero permite la eficacia y el desarrollo del segundo. En el caso de los palés, la regulación de estos no es solo beneficiosa para su fabricación y uso, también lo es para su reutilización y reciclaje. Con el auge de la industria del reciclaje del palé, la facilidad y rapidez de su desensamblaje ha mejorado. Este desarrollo



Fig. 43 Viga de madera laminada encolada.
Fuente: <https://www.archiexpo.es/prod/holzwerk-gebrschneider/product-55688-147278.html>



Fig. 44 Panel de CLT.
Fuente: <https://www.maderea.es/que-son-los-paneles-contralaminados-o-clt/>

industrial ha permitido generar un proceso más eficiente de separación de las partes componentes y, por tanto, un reciclaje de las tablas más asequible. Por todo esto, las posibilidades de reutilización de estas piezas de madera aumentan y se diversifican más allá de su empleo como piezas de repuesto para palés deteriorados.

En los comienzos de este trabajo, se realizó una visita a la empresa vallisoletana Maderas Pisuerga para recabar información sobre el procesado de la madera en distintos tipos de productos. Esta compañía se dedica al sector maderero y produce palés, elementos varios de embalaje, mobiliario de carpintería y productos de construcción como encofrados y algunos elementos estructurales para cubiertas, marquesinas, pasarelas, escaleras... Durante la visita, el gerente sugirió una alternativa de reciclaje de los palés desensamblados empleando sus tablas para conformar paneles prefabricados para entramados ligeros. El problema fundamental de este sistema constructivo (Fig. 42) es la falta de inercia, tanto térmica como acústica. Con las tablas de los palés se podría generar un panel macizo para colocar en los intersticios de este sistema constructivo aportándole aislamiento acústico y térmico. Las ventajas fundamentales de esta opción de reciclaje son que, al no ser un elemento estructural ni visto, la selección de las tablas no necesitaría ser muy exhaustiva ni el desmontaje demasiado cuidadoso.

Los productos de madera laminada (Fig. 43) serían otro campo interesante de aplicación de las tablas de los palés, también por explorar. Tales productos se fabrican a partir de láminas de madera encoladas. Están formados por al menos cuatro láminas, empalmadas con uniones dentadas (*finger-joint*) hasta la longitud deseada y con un grosor máximo de 45 mm cada una. El proceso de fabricación de la madera laminada encolada consta básicamente de nueve fases: 1) Acopio y selección de las láminas, 2) paso por el secadero, 3) clasificación visual y marcado de singularidades, 4) saneado automático, 5) entalladura de la unión dentada testa-testa, 6) empalme de láminas, 7) fraguado de la lámina en su longitud, 8) preparación de los moldes de presión y 9) encolado continuo, apilado de láminas y aplicación de presión constante en molde (Basterra Otero y Balmori Roiz, 2018).

Para desarrollar esta aplicación convendría diseñar un sistema semejante al comentado en el punto 1.4 Posibilidades de reutilización de la madera en la construcción de este mismo trabajo, desarrollado por CaReWood, previo al proceso habitual de fabricación de productos laminados. Aplicando las fases descritas por Risse et al (2019) el proceso previo sería el siguiente:

1. Recolección y transporte de los palés a la fábrica de procesado.
2. Desensamblaje de las piezas y clasificación visual de las mismas.
3. Eliminación de impurezas como piezas metálicas o de plástico adheridas.

4. Secado, si fuera necesario, para conseguir alrededor de un 12% de humedad.
5. Limpieza mecánica de superficies, para eliminar los acabados aplicados para el uso anterior y apertura de poros.

Una vez realizadas estas cinco fases se continuaría con el procedimiento habitual en productos de madera laminada encolada a partir de la fase 5) entalladura de la unión dentada testa-testa. Para terminar con la aplicación de tratamientos, si fuera necesario, y la distribución del producto obtenido.

Mediante este proceso se podrían obtener, al igual que en el sistema CaReWood, productos de madera laminada encolada como vigas de pequeñas dimensiones o carpinterías para ventanas de madera.

Por último, otra aplicación similar sería la incorporación de las tablas de los palés en la fabricación de paneles de madera contralaminada (CLT). Estos paneles (Fig. 44) consisten en una superposición de al menos tres capas de tablas de madera, pero, al contrario que en los anteriormente descritos productos de madera laminada, cada capa de tablas se dispone de manera perpendicular a la anterior. Las tablas que componen cada capa del CLT tienen un espesor de entre 16 y 51 mm (Karacabeyli y Douglass, 2013). El espesor de láminas de los paneles de CLT hace esta opción más conveniente



Fig. 45 Virutas de madera triturada.

Fuente: <https://www.diariodepontevedra.es/articulo/economia/biomasa-termica-despega-galicia-plantas-pellets-astillas/201812210034091014632.html>



Fig. 46 Máquina trituradora de palés.

Fuente: <https://shs-renewables.ie/wood-chip-machines/pallet-chipper/>

que la opción de los productos de madera laminada. A este recurso se le dedicará el apartado específico "0

Fabricación de paneles CLT con madera de palés de este trabajo.

3.3 REGENERACIÓN DE LA MATERIA PRIMA: trituración del palé

La trituración de los palés es actualmente la forma de reciclaje más extendida. La ventaja principal es que no necesita de una etapa de clasificación y desmontaje. Los desechos de madera son un recurso "renovable" que puede ser empleado para fabricar tableros derivados de la madera o para producir energía como biomasa.

El problema de esta forma de reciclaje es cuando se lleva a cabo en escalones muy tempranos de la vida de la madera. La trituración es considerada entonces infrarreciclaje ya que degrada las propiedades del material y marca el último escalón de su posible ciclo de vida, no agotando del todo su durabilidad potencial. La trituración de los palés sólo debería realizarse en aquellos que no puedan optar a otro modo de reciclaje, como alternativa final.

La decisión entre emplear los palés para tableros o para recuperación de la energía puede tomarse basada en la calidad de la madera con la que estén fabricados. La de mayor calidad irá destinada a lo primero y la de menor

calidad se incinerará para la recuperación de energía. Cabe destacar que la producción de tableros derivados de la madera tiene un mayor impacto ambiental que la incineración, debido a que necesita más energía y requiere gran cantidad de productos químicos para su procesado (Kim y Song, 2014).

La recuperación de energía a partir de la madera de palés conlleva su astillado previo. En ningún caso los palés se emplean para la fabricación de pellets debido a que, por las condiciones a las que puede haber estado sometida la madera, podrían contener incrustadas sales, piedras, suciedad que emita gases nocivos...

En todo caso, el principal uso actual de la madera reciclada de los palés es la fabricación de tableros. El uso de tableros y paneles derivados de la madera ha aumentado en el sector de la construcción en los últimos treinta años. Los más frecuentemente utilizados son los de madera contrachapada, tableros de fibras orientadas (OSB), tableros de partículas o aglomerados, tableros de fibra de alta densidad (HDF) y tableros de fibra de densidad media (MDF) (Emedec, 2020). Cada uno de ellos tiene unas características diferentes y por tanto se emplea para un uso distinto.

Actualmente, los restos de palé se emplean, sobre todo, para la fabricación de tableros MDF y conglomerados. Estos tipos no tienen un uso estructural, si no que actúan como elementos secundarios de algunos sistemas constructivos o se emplean en la fabricación de muebles. No obstante,

dependiendo del proceso de trituración y conformado del tablero se podría obtener cualquiera de los otros tipos. La obtención de un tipo u otro es un asunto principalmente económico.

Todos los tableros derivados de la madera, sin importar la procedencia de los materiales que los componen, deben cumplir la norma UNE EN 13986:2015 Tableros derivados de la madera para la utilización en construcción – Características, evaluación de la conformidad y marcado. Esta norma regula los usos para los que se pueden aplicar estos tableros, exige el cumplimiento de unas características mínimas y la metodología a seguir en las pruebas para asegurar su calidad y seguridad.

4 Fabricación de paneles CLT con madera de palés

Entre las opciones de reciclaje planteadas en el punto 4.83 de este trabajo, y como uno de sus objetivos principales, se procede a continuación a estudiar la posibilidad de fabricación de paneles CLT a partir de las tablas obtenidas del desensamblaje de palés.

Se opta por ello debido a su posible interés en el ámbito de desarrollo de nuevos materiales y procesos innovadores de construcción, y por su posible aplicación posterior a un desarrollo industrial en un contexto de ecodiseño y economía circular, a partir de la revalorización de residuos, ya comentado anteriormente.

Entre las tres variantes expuestas en el apartado 3.2 "REELABORACIÓN: Reaprovechamiento de los elementos del palé para generar materiales de construcción", la construcción de paneles de CLT parece la óptima por cuestiones de compatibilidad dimensional y de fabricación.

Por supuesto, la propuesta de fabricación que se hace a continuación necesitaría, a partir de la hipótesis anterior, unas fases previas de ensayos en laboratorio, un desarrollo industrial de maquinaria que pudiera automatizar el proceso y por último estudios de viabilidad, tanto económica como medio ambiental. Todo esto implica la necesidad de elaboración de un proyecto de investigación y la correspondiente búsqueda de financiación.

La Unión Europea desde el año 2014 promueve actividades de investigación e innovación desde el programa Horizonte 2020. Los pilares fundamentales tratan de contribuir a abordar los retos sociales, a promover el liderazgo industrial y a reforzar la excelencia de la base científica. Dentro de este programa, con posibilidad de financiar proyectos de investigación durante tres años con presupuestos mayores a dos millones de euros, los retos sociales incluyen todos aquellos temas de acción por el clima, medio ambiente, eficiencia de los recursos y materias primas, silvicultura sostenible, bioeconomía, etc. En muchos de los aspectos propuestos por el programa Horizonte 2020 cabría el tema que se propone a desarrollar. Además, el Ministerio de Ciencia e Innovación emite sus propias ayudas a la investigación desde el Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación, con unos objetivos prácticamente comunes a los marcados por la Unión Europea.



Fig. 47 Colocación en obra de un panel CLT.
Fuente: <https://www.klh.at/es/formatos-acabados-y-detalles-tenicos/>

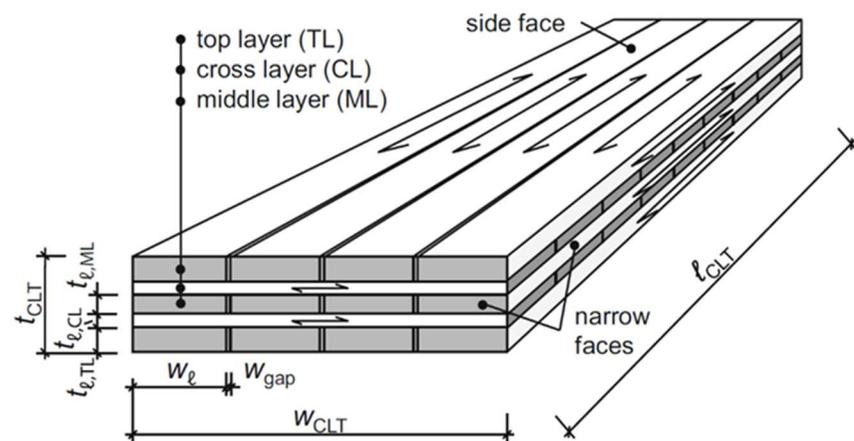


Fig. 48 Dibujo técnico de un panel CLT con especificaciones de dimensiones, variables importantes y términos.
Fuente: Brandner et al (2016)

La investigación sobre nuevos materiales de construcción más sostenibles es un tema muy presente en la investigación de hoy en día, al igual que el reciclaje y la revalorización de residuos. Y la construcción de paneles CLT mediante las tablas desensambladas de los palés combina estos dos aspectos.

4.1 Proceso de fabricación de los paneles CLT

Desarrollada en Austria en la década de los 90, la madera contralaminada – CLT, cross-laminated timber- es un tipo de producto muy polifacético dentro de la ingeniería de la madera que se emplea en cubiertas, muros y forjados (Chen, Pierobon y Ganguly, 2019). Este material ha ido aumentando su popularidad para su uso en edificios residenciales y de oficinas en multitud de países. Aunque es en Europa -en países como los nórdicos, Austria y Alemania donde tiene un mayor recorrido-, en la última década se ha extendido a Canadá, Estados Unidos, China, Nueva Zelanda y Japón (Brandner et al, 2016).

El panel CLT está compuesto por capas de tablones de madera acoplados en paralelo, y apiladas y encoladas en direcciones perpendiculares en cada capa, para crear un panel sólido. Aparte del encolado, también existen soluciones de CLT con clavos o tacos de madera, para fijar las distintas capas. Está considerado un producto de madera masivo que complementa los actuales

sistemas constructivos de madera, e incluso se plantea como el sustituto del hormigón.

De manera más precisa, Egoín, empresa española líder en el sector de construcción en madera del sur de Europa, define el CLT como:

Paneles de madera macizos formados por tablas encoladas por capas y cruzadas entre las mismas, siempre en número impar. Se forman planchadas de tablas del espesor que corresponda, juntadas por presión lateral sin cola. Se extiende una lámina de cola en toda la superficie de la madera, se vuelve a colocar una segunda planchada en sentido transversal (90° respecto a la precedente), se vuelve a extender una nueva lámina de cola y se vuelve a colocar una nueva capa de madera. Una vez colocadas todas las capas de madera se procede al prensado.

El número de planchadas de madera es tres, cinco o siete, pero pueden ampliarse hasta formar el panel completo del espesor definido en el proyecto. (Egoín, s.f.)

El espesor de un panel CLT tiene siempre al menos tres capas de tablas alternando, la dirección de sus fibras, sumando siempre un número impar. Existen configuraciones especiales en las que capas consecutivas se disponen en la misma dirección para obtener capacidades estructurales específicas (Caracabeyli y Douglas, 2013).

4. FABRICACIÓN DE CLT CON MADERA DE PALÉS

El grosor de las tablas de madera que componen el panel varía entre los 12 y 45 mm, y el ancho entre los 40 y 300 mm. Los estándares europeos, tratando de imponer unas medidas comunes para favorecer la industrialización de este producto, proponen un espesor de las tablas de $t_j = 20, 30$ o 40 mm y una anchura de $w_j = 150$ mm (Brandner et al, 2016). En cuanto a las dimensiones del panel, varían en función de las fábricas, los anchos normales son de 600, 1200, 2400 o 3000 mm. El panel se corta según la longitud que se precise en cada proyecto, puede medir hasta 18 metros. De hecho, las limitaciones de longitud suelen ir condicionadas por las regulaciones en el transporte.

Por otro lado, el tipo de madera que se emplea suele ser de conífera. Aunque también se pueden usar especies frondosas para la fabricación de estos productos, es poco común. Generalmente se emplea madera de baja calidad clasificada como "de segunda" según la industria del aserrado. Esta madera se emplea en la fabricación de paneles CLT porque, gracias a la configuración de estos, se mejora la capacidad resistente y rigidez de la madera y además se revaloriza en el mercado (Álvarez del Río, 2016). Una de las especies más utilizadas por Egoín, empresa española de referencia en el sector maderero y radicada en el País Vasco, es el pino radiata, muy abundante en su territorio.

Otras opciones para la fabricación de CLT son los productos SCL (Fig. 49) – *Structural Composite Lumber*– entre los que se encuentran la madera



Fig. 49 Tipos de productos SCL. De arriba abajo: madera microlaminada, madera reconstituida y madera reconstituida laminada.
Fuente: <https://www.weyerhaeuser.com/>

microlaminada o LVL, la madera reconstituida o PSL y la madera reconstituida laminada o LSL. (Caracabeyli y Douglas, 2013 y Weyerhaeuser, s.f.).

La madera colocada en las capas exteriores de los paneles CLT se orienta en sentido vertical cuando se van a emplear en muros. De esta manera, las fibras son paralelas a la dirección de las cargas y se aprovecha al máximo la capacidad portante del panel. Cuando se emplean en forjados o cubiertas, se colocan de manera que la dirección de las capas exteriores vaya en el sentido del vano mayor.

El proceso de fabricación del CLT se explica esquemáticamente en la Fig. 50. En función de la capacidad de la fábrica, la maquinaria que disponga y el tipo de adhesivo, el proceso conlleva entre 15 y 60 minutos. Carcabeyli y Douglas (2013) dividen la producción en nueve fases:

1. Primera selección de la madera. Se realiza una comprobación del contenido de humedad de las piezas, una clasificación visual y, si fuera necesario, una clasificación empleando medios electrónicos de escaneo. El contenido de humedad recomendable para la fabricación de CLT es menor que el aceptado para la fabricación de otros productos de madera. En general, las tablas de madera aserrada se suelen someter a un proceso de secado para alcanzar una humedad de entre el 12 y el 15 % cuando llegan a la fábrica. Con esto se evitan variaciones dimensionales y se asegura el correcto

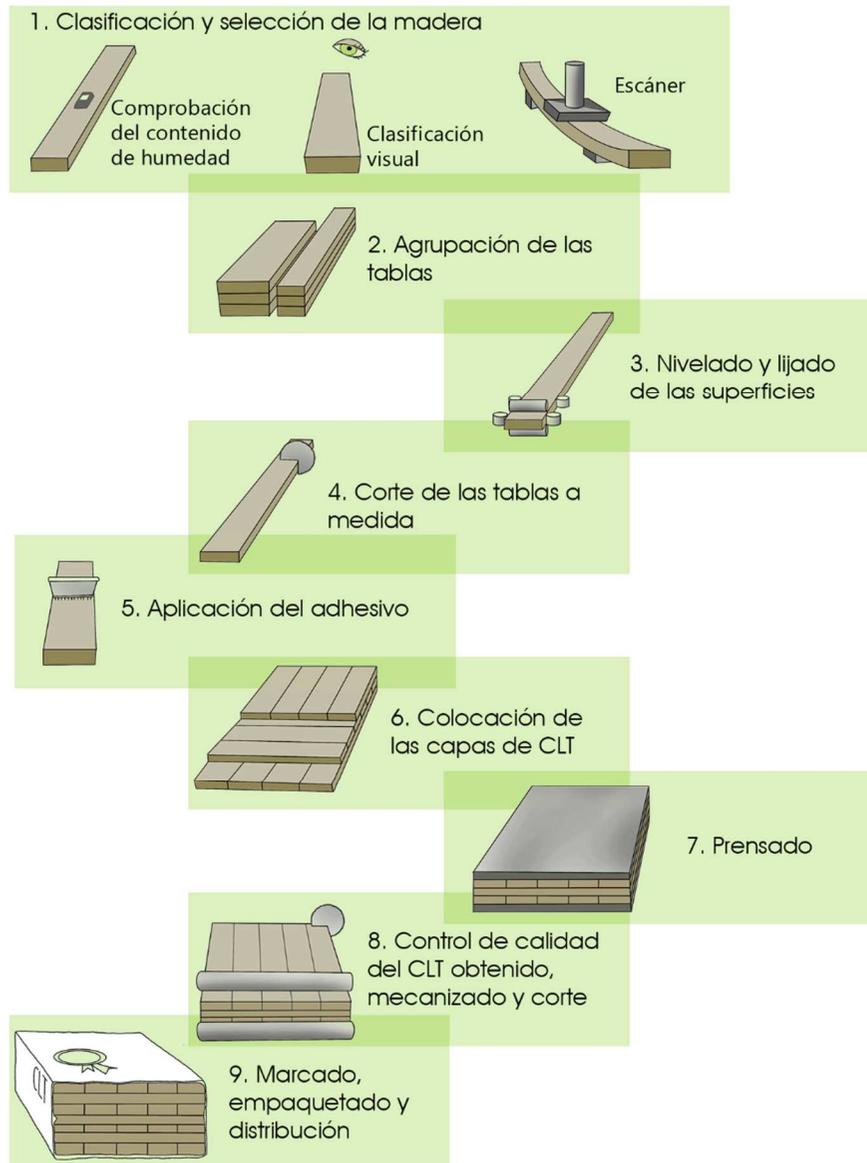


Fig. 50 Proceso de fabricación de los productos de CLT.
Fuente: Caracabeyli y Dpuglas (2013).

funcionamiento del adhesivo, ya que muchos de los que se emplean son bastante sensibles a la humedad de la madera.

Otra de las variables que afectan al enlace del adhesivo es la temperatura pues cada uno requiere s condiciones específicas de temperatura y humedad. Las variaciones de estas condiciones afectan al ensamblaje y proceso de curado del adhesivo. Es conveniente mantener una temperatura en fábrica por encima de los 15°C y monitorizar las condiciones climáticas desde el momento en que la madera llega a la fábrica.

2. Agrupación de las tablas. Se colocan las tablas formando las capas que compondrán el CLT teniendo en cuenta el contenido de humedad y la clasificación visual realizada en la fase anterior. Los tableros en la misma dirección han de tener unas propiedades lo más similares posibles. En las capas exteriores se coloca la madera de mayor calidad estética.
3. Nivelado y lijado de las superficies. Este proceso se realiza para reducir la oxidación en la superficie de la madera y mejorar la efectividad del adhesivo. La eliminación de una fina capa abre el poro del material y asegura un mejor enlace y, por eso, se recomienda rebajar 2,5 mm el espesor y 3,8 mm la anchura de la tabla.
4. Corte de las tablas a medida.



Fig. 51 Panel CLT en fábrica.

Fuente: <https://egoin-andalucia.com/sistema-constructivo-clt/>



Fig. 52 Obra realizada con paneles CLT en forjados y muros.

Fuente: <https://egoin-andalucia.com/sistema-constructivo-clt/>

5. Aplicación del adhesivo. El adhesivo se debe aplicar inmediatamente después del lijado, para evitar que aparezca de nuevo oxidación en las superficies, una posterior inestabilidad dimensional o envejecimiento, además se asegura una mejor impregnabilidad y, por tanto, el enlace es más efectivo. Otro aspecto importante para el correcto funcionamiento del adhesivo es la limpieza de las superficies de madera a pegar, asegurando que no haya aceites o grasas. Los adhesivos más comúnmente empleados son:
 - Adhesivo de poliuretano o PUR. El más usado en Europa.
 - Isocianato polimerizado en emulsión o EPI.
 - Adhesivos fenólicos como el fenol resocinol formaldehído o PRF.
6. Colocación de las capas del CLT. En esta fase tiene gran importancia controlar el tiempo de ensamblado: intervalo de tiempo que pasa desde que se esparce el adhesivo hasta que se introduce el panel de CLT en la prensa. El ensamblado necesita ser programado con exactitud para evitar superar el plazo establecido por el fabricante de adhesivo. En caso de que las condiciones ambientales de la fábrica no sean las ideales, conviene disminuir lo máximo posible ese período de ensamblado.

7. Prensado. El prensado es una etapa crítica que define la calidad del CLT, ya que influye en la calidad del enlace. Existen dos tipos de prensas:
 - Prensa de vacío: ejerce una presión insuficiente para eliminar la curvatura que puedan tener las capas y no corrige las irregularidades en las superficies. Por estos motivos puede no producirse un contacto pleno entre las capas.
 - Prensa hidráulica: ejerce mucha mayor presión que la prensa de vacío y solventa los problemas que la anterior no. Es la más utilizada en la industria de la madera.
8. Control de calidad del CLT obtenido, mecanizado y corte. Una vez prensado, el panel de CLT se lija con una lijadora industrial para obtener el espesor preciso. Posteriormente se introduce en una máquina de corte por control numérico (CNC) para realizar las perforaciones correspondientes a ventanas y puertas, escaleras... Por último, en caso de que fuera necesario, se realizan reparaciones menores de forma manual para asegurar el perfecto acabado del panel.
9. Marcado, empaquetado y distribución. El marcado del producto permite a los diseñadores, contratistas y autoridad competente en cada caso, comprobar la autenticidad del producto y sus

características. Además, pueden contener información relevante como la dirección principal de carga, las zonas más adecuadas para la colocación de conectores...

Una vez finalizada la etapa de fabricación, los paneles CLT son transportados hasta la obra que los precise. Debido al alto grado de prefabricación que permite este sistema, el transporte ha de ser estudiado concienzudamente con anterioridad para asegurar su viabilidad y seguridad. El transporte puede llegar a encarecer el precio del material considerablemente, dependiendo del tamaño de los elementos. Cuando llega a la obra hay que tener ciertas precauciones en su almacenaje si no va a ser colocado inmediatamente. Hay que protegerlos de los elementos atmosféricos como la lluvia o la radiación solar directa y separarlos del suelo y de cualquier otro contacto con la humedad.

Dentro del proceso del proceso constructivo, las uniones, como en todas las estructuras de madera, toman gran importancia. Mediante conectores se mantiene la integridad de la estructura y proporcionan resistencia, rigidez, estabilidad y control de las deformaciones. Teniendo en cuenta que los paneles CLT se colocan como muros, forjados y cubiertas, los encuentros típicos a resolver son: panel con panel –entre suelos, muros o cubiertas-, muro con cimentación, intersección de muro con muro y de muro con forjado o cubierta.



Fig. 53 Puesta en obra de los paneles CLT.
Fuente: <https://egoin-andalucia.com/sistema-constructivo-clt/>



Fig. 54 Puesta en obra de los paneles CLT.
Fuente: <https://egoin-andalucia.com/sistema-constructivo-clt/>

El CLT constituye un sistema constructivo que ya se emplea en gran cantidad de edificios en todo el mundo. Se está extendiendo con relativa rapidez por todas las ventajas que ofrece a la construcción, especialmente aplicado en edificios de altura media:

- Es un sistema de gran adaptabilidad pues, con el mismo panel se construyen forjados, muros y cubiertas. A esto se le añade la facilidad de incorporar acabados interiores y exteriores preinstalados en los paneles.
- Se puede emplear de manera modular, lo que le hace ideal para ampliaciones en edificios existentes.
- Se puede utilizar conjuntamente con otros sistemas constructivos como entramados ligeros, acero u hormigón, y acepta una gran variedad de acabados.
- Permite un alto grado de prefabricación, lo que supone una reducción notable del tiempo de ejecución de la obra, en el consumo de energía y en las emisiones de gases contaminantes. Gracias a todo esto se consigue disminuir el impacto en el entorno (Álvarez del Río, 2016). A mayores, la prefabricación asegura una alta precisión del sistema y una mayor seguridad en el ambiente de trabajo.

- Necesita una menor especialización de la mano de obra al tratarse de uniones simples entre elementos de madera y tampoco requiere maquinaria especial.
 - Para los sistemas de fachada, la construcción con CLT se caracteriza por su clara separación de las capas constructivas, aislamiento, instalaciones y revestimiento. Esta diferenciación de capas permite la prefabricación en cada sistema constructivo, la ejecución completa de cada parte y los posibles trabajos de sustitución o reparación posteriores (Brandner et al, 2016).
 - A pesar de formar muros de carga, se pueden abrir huecos con bastante libertad.
 - Tiene una gran durabilidad.
 - El contralaminado de la madera proporciona a los paneles gran estabilidad dimensional y resistencia a cortante y a flexión en ambas direcciones del panel –actúa similar a una losa de hormigón armado- (Caracabeyli y Douglas, 2013). Su gran capacidad portante permite la esbeltez de los paneles.
 - En comparación con otros sistemas constructivos de madera, tiene una menor permeabilidad al paso del aire. Los paneles son en sí mismos estancos, sin embargo, hay que prestar especial atención a las juntas.
- Es un buen aislante térmico, obteniendo valores de $\lambda=0.13$ W/mk. Para evitar los puentes térmicos, de nuevo toma especial importancia el sellado de sus juntas.
 - La mayor densidad del CLT en comparación con otros sistemas de madera hace que mejore sus características de aislamiento acústico. Con el CLT se consigue disminuir el tiempo de reverberación y se consigue controlar el ruido de impacto y el ruido aéreo con la colocación de membranas elásticas en todas las juntas (Di Bella y Mitrovic, 2020).
 - Tiene una gran inercia térmica y una buena capacidad de almacenamiento de la humedad. Estas cualidades mejoran las condiciones de habitabilidad manteniendo unas condiciones ambientales constantes en el interior. AITIM (s.f.) define la capacidad de almacenamiento de humedad como la capacidad de equilibrar la humedad ambiental absorbiéndola o liberándola, aproximando su valor a los niveles idóneos para el bienestar humano.
 - Se comporta bien ante situaciones de incendio.

Considerando el rápido desarrollo y el creciente interés por el CLT de los arquitectos e ingenieros, está claro que la producción de CLT se disparará en los próximos años. Por esta razón, es necesaria la definición de un sistema estandarizado clarificador a nivel global que describa regulaciones del producto, ensayos, detalles constructivos y finales de vida posibles; así como

alternativas innovadoras aún más ecoeficientes a partir de residuos de la descomposición de otros productos de madera, como son los palés.

Los productos de CLT no solo abren posibilidades dentro de la ingeniería de la madera, también las abren en el sector de la construcción. Las ventajas comentadas anteriormente pueden hacer que este sistema suponga un cambio en la forma de construir. De hecho, los paneles CLT no compiten con el resto de los productos de madera basados en elementos lineales; compite con los sistemas constructivos masivos como el hormigón, porque además de las innumerables ventajas constructivas, aporta sostenibilidad y beneficia la economía circular.

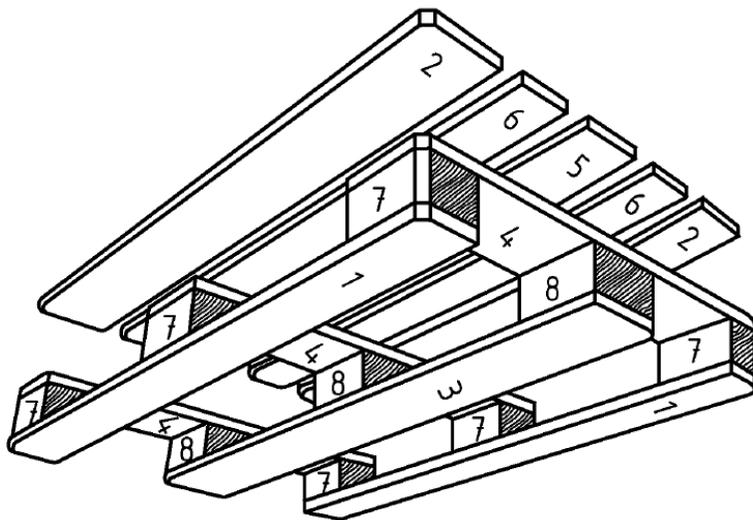


Fig. 55 Piezas de los elementos de una paleta de 800 mm x 1 200 mm.
Fuente: UNE-EN 13698-1:2003

4.2 Aplicación de la madera de palés en la fabricación de paneles CLT

Una de las principales características que aporta la disposición de las capas sucesivas de manera perpendicular, es que los paneles de CLT no necesitan una madera de muy alta calidad para obtener una gran capacidad resistente, ni unos troncos de grandes diámetros para obtener piezas de considerables dimensiones. Es decir que mediante el encolado de tablas de 20 mm de espesor por 150 mm de anchura y por una longitud cualquiera, se obtienen paneles de hasta 500x3000x18000 mm con altas capacidades portantes. Si nos fijamos en un palé europeo, las once tablas que contiene cada palé pueden medir 22x100x1200 mm, 22x145x800mm o 22x145x1200 mm según la norma UNE-EN 13698-1:200. A priori, las medidas encajan dentro de las recomendaciones para conformar las láminas de CLT.

Previo al proceso de fabricación comentado en el apartado anterior, habría que diseñar unas etapas de limpieza y adecuación de estas tablas, al no tratarse de madera nueva. Al tratarse de una forma de reciclaje novedosa, aún no desarrollada industrialmente, las etapas que se mencionan a continuación reflejan simplemente una propuesta fundamentada en las prácticas de recuperación de madera, el sistema CaReWood comentado en el apartado "1.4 Posibilidades de reutilización de la madera en la construcción", de este trabajo y en el artículo de Munandar, Purba y Christiyanto (2019).

En primer lugar, sería necesario generar un sistema de recolección de palés. Para este caso concreto de reciclaje, los palés que pueden interesar más son aquellos de un solo uso, utilizados siguiendo un ciclo abierto. Aunque es cierto que la madera de este tipo de palés suele ser de peor calidad, el déficit de calidad no genera tanto problema como el mal estado de los palés, que tengan tablas rotas o deformadas por el uso.

Tras la recolección se procedería al desensamblaje para obtener las tablas. Los tacos sobrantes se pueden destinar a la producción de energía. Entre las tablas obtenidas, conviene realizar una clasificación visual para escoger aquellas que estén en mejor estado. Principalmente habría que fijarse en que no tuvieran deformación ya que dificultaría el proceso de encolado y restaría eficiencia al adhesivo. Una clasificación más minuciosa conllevaría a realizar ensayos no destructivos para agrupar maderas por especies de semejantes cualidades, lo que aportaría mayor homogeneidad al panel CLT.

La existencia de impurezas incrustadas y de suciedad por vertidos no es tan relevante para el proceso de selección. Posteriormente se puede realizar una etapa de limpieza para eliminar de las superficies toda suciedad o elemento adherido. Una vez se haya realizado esta primera limpieza, se realizaría el corte a medida, si fuera necesario, y el lijado para obtener una forma regular del tamaño deseado. Las tablas colocadas en los extremos de los palés - tablas 1, 2 y 4 según Fig. 55 tienen las esquinas redondeadas para la

seguridad de manejo del palé. Estas tablas necesitarían eliminar de su ancho el tamaño correspondiente a ese remate. El lijado se llevaría a cabo en todas ellas, para eliminar las impurezas que persistan tras la primera limpieza y para dar regularidad a la tabla. Aproximadamente supondría eliminar unos 2 mm de cada lado (Munandar, Purba y Christiyanto, 2019). Si a esta reducción de dimensiones le añadimos el posterior lijado para eliminar la oxidación, teniendo en cuenta las recomendaciones de eliminar 2,5 mm del espesor y 3,8 mm del ancho, se obtendrían las siguientes tablas tomando de referencia los tipos diferenciados en la Fig. 55.

- Dos tablas de 15x70x1200 mm correspondientes a las tablas tipo 1.
- Dos tablas de 15x115x1200 mm correspondientes a las tablas tipo 2.
- Cinco tablas de 15x135 mm con longitud 1200 mm o 800 mm correspondientes a las tablas tipo 3, 4 y 5.
- Dos tablas de 15x90x100 mm correspondientes a las tablas tipo 6.

Para facilitar la fabricación del CLT convendría establecer uno o dos tamaños de ancho de tabla. Para tomar esta decisión sería necesario evaluar las pérdidas de material por cortar todas las tablas al tamaño de 70 mm. O, por el contrario, desechar las de 70 mm y establecer un tamaño intermedio.

Al concluir todo este procedimiento previo, las tablas estarían listas para pasar por las fases habituales para la obtención final del panel CLT. Estos paneles a partir de madera reciclada podrían tener dos variantes: se podrían

construir todas las capas a partir de madera de palés o podrían incluir solo ciertas capas de madera de reciclado, realizando las capas exteriores con madera de mayor calidad.

Las dos últimas etapas del proceso de producción habitual del CLT tenían entre sus funciones realizar los controles de calidad y los marcados de los paneles. En este caso, dado que este modo de fabricación estaría aún en fase experimental, se necesitaría comprobar sus propiedades resistentes y elásticas mediante ensayos de caracterización en laboratorios. Dentro de las propiedades resistentes habría que determinar la dureza, tracción paralela y perpendicular a la fibra, compresión paralela y perpendicular a la fibra, resistencia a flexión y cortante. En el caso de las propiedades elásticas, se estudia además el Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rigidez (Pemade.com, s.f.).

Se deben obtener según la norma UNE-EN 16351 Estructuras de madera. Madera contralaminada. Requisitos:

- Mediante determinación y declaración de los datos de geometría y las propiedades correspondientes de las capas. En el caso de las capas de madera de reciclaje este método no sería válido ya que las piezas no tienen las condiciones de inicio al haber estado sometidas ya a un uso.

- Mediante ensayos de la madera contralaminada y declaración de datos de geometría y de las propiedades correspondientes recalculadas de las capas, determinadas mediante ensayos.

A mayores, deben hacerse ensayos de resistencia del encolado, resistencia al fuego, reacción al fuego, estabilidad dimensional, emisión y contenido de sustancias peligrosas, durabilidad de la resistencia del encolado y durabilidad frente a los ataques bióticos. El apartado "6.2.2 Muestras, ensayos y criterios de conformidad" de la norma UNE-EN 16351 contiene una tabla resumen del método de evaluación que procede en cada caso, el número de muestras necesarias y los criterios de conformidad.

4.3 Comprobación de la viabilidad de la fabricación de paneles CLT con madera de palés

La investigación y realización de ensayos sobre esta nueva forma de reciclaje no debería limitarse únicamente al campo experimental si no tratar de dar un salto a la industria. Para ello, es fundamental comprobar si los productos obtenidos son viables desde un punto de vista económico; es decir, si aportan rentabilidad al productor. Y, desde un punto de vista medioambiental, si este escalón añadido reduce las emisiones o se traduce en una utilización más eficiente de la madera.

Para realizar este tipo de comprobaciones existen diversos tipos de análisis que ya se aplican a gran cantidad de productos alrededor del mundo. Dos análisis muy comúnmente utilizados son:

- Análisis del Ciclo de Vida o ACV –life cycle assesment o LCA en inglés-.
- Análisis de Costes del Ciclo de Vida CCV –life cycle costing o LCC en inglés-.

4.3.1 Análisis del Ciclo de Vida

Es una herramienta de diseño que investiga y evalúa los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales a lo largo de todas las etapas de su existencia: desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (UNE-EN ISO 14040). Para ello cuantifica el uso de recursos –entradas- y las emisiones ambientales –salidas-. El ACV es una metodología que tiene como particularidad la utilización de métodos cuantitativos y la identificación de aspectos ambientales clave de un producto, proceso o servicio.

Es importante remarcar que no se trata de una evaluación de riesgo ya que no tiene en cuenta la exposición, factor fundamental para evaluar el riesgo. El ACV cuantifica las emisiones, aunque el impacto real de las mismas depende del momento, el lugar y la forma en que se liberen. Con este análisis

se pueden responder preguntas como ¿Cuáles son las contribuciones relativas de las diferentes etapas del ciclo de vida de este producto a las emisiones totales? Y ¿Qué diferencia existe entre el posible impacto ambiental de un producto nuevo y otros productos ya existentes en el mercado? (Wikipedia.org, 2020)

El estudio se compone de cuatro fases, conforme a la norma UNE-EN 14040:

1. Definición del objetivo y alcance. Se define el propósito del estudio y los objetivos de este, se identifica el producto y para qué se va a utilizar el estudio. El objetivo y alcance han de estar en consonancia con la aplicación prevista del análisis. A mayores, se definen los límites del sistema y las hipótesis empleadas.
2. Análisis del Inventario del Ciclo de Vida o ICV. Se identifican y cuantifican las entradas de materias primas y energía y las salidas del proceso en forma de emisiones o residuos.
3. Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida o EICV. Se trata de evaluar la importancia potencial de los impactos ambientales basándose en el análisis de la fase anterior. Dentro de esta fase se procede a seleccionar las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización; se asigna los resultados del ICV a las categorías seleccionadas, y, por último, se mide el impacto.

4. Interpretación de resultados. En esta fase se trata de identificar y evaluar las oportunidades de mejora en el proceso para reducir los impactos ambientales.

Existe una metodología de ACV adaptada a la construcción. Esta metodología aparece desarrollada por el Comité Europeo para la Normalización en su norma CEN/TC 350 "Sostenibilidad en la construcción", y contiene cuatro fases: producción del edificio, construcción del edificio, uso y mantenimiento y demolición, reutilización o reciclado. Adicionalmente, la norma UNE-EN



Fig. 56 Superposición de los tres tipos de análisis de sostenibilidad que dan como resultado el LSCA.

Fuente: elaboración propia basada en https://www.researchgate.net/figure/The-overlap-between-the-three-pillars-of-sustainability-resulting-in-LCSA_fig1_301823430

15978 "Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del Comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo" define una quinta fase de beneficios y cargas más allá del ciclo de vida de un edificio.

Aplicar este análisis al CLT realizado mediante madera de palés aportaría una cuantificación del impacto ambiental de esta forma de reciclaje y, además, se podría establecer una comparativa con el CLT realizado con madera nueva. Los resultados permitirían concluir si esta forma de reciclaje es beneficiosa desde el punto de vista medioambiental.

4.3.2 Análisis de Costes del Ciclo de Vida

Se define como el análisis de todos los costes asignables a un producto o servicio, desde que se inicia la concepción de la idea hasta el final de su vida útil, por o para cualquier agente asociado a las fases de la vida del mismo. Incluye el precio de compra y todos sus costes asociados (envío, instalación, seguros...), los costes de operación como la energía, el consumo de agua y combustible, el mantenimiento, y los costes de final de vida o el valor residual (Ec.europa.eu, 2020). Además, también se tienen en cuenta los denominados costes externos, que tienen que ver con el deterioro medio ambiental: emisiones de gases de efecto invernadero y otros vertidos contaminantes y costes de mitigación del cambio climático (Parlamento Europeo, 2014).

Mediante el análisis de costes, se pueden analizar los costes de cierto producto desde la perspectiva del productor y desde la del consumidor.

Realizar este análisis permite ampliar la conciencia del comprador acerca de los costes de uso, mantenimiento y disposición, que no aparecen reflejados en el precio de compra. El principal potencial de ahorro en el ciclo de vida de un producto es en el control del uso de energía agua y combustible, en la reducción de costes de mantenimiento o sustitución y ahorrando en los costes del final de vida.

En el caso concreto de aplicar este análisis al CLT realizado con madera reciclada, obtendríamos comparativas interesantes de los costes de este sistema de reciclaje en comparación con otros sistemas. Con estos datos y los del precio del producto obtenido se podría decidir la viabilidad de esta forma reciclaje de palés. Otra comparación posible sería con el proceso de fabricación de un panel CLT convencional.

Se propone la realización de estos dos tipos de análisis puesto que son metodologías ampliamente extendidas y reguladas por Directivas Europeas. Aunque no dan datos definitivos sino de potenciales costes y potenciales impactos ambientales, pueden servir de primera aproximación. Es necesario tener en cuenta que el desarrollo industrial posterior en el caso de que este sistema de reciclaje de palés fuera viable, haría más eficiente el proceso de fabricación de paneles CLT. Con el aumento de eficiencia del sistema

4. FABRICACIÓN DE CLT CON MADERA DE PALÉS

industrial, se obtendrían unos valores más favorables en los dos análisis en comparación con los obtenidos en una primera etapa de investigación y desarrollo.

Estos análisis se pueden realizar de manera simultánea siguiendo la metodología que plantea el análisis de sostenibilidad del ciclo de vida –Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA-, que tiene en cuenta, además de los aspectos ambientales y económicos, la influencia social que puede tener la fabricación de cierto producto.

5 Conclusiones

Durante el proceso constructivo se desarrollan actividades con gran impacto ambiental. De entre todas sus fases, la de construcción y la de uso son las que acarrear mayores consecuencias medioambientales. Para disminuirlas, durante la fase de uso, se han desarrollado sistemas para que los edificios sean de consumo cero. En la fase de construcción, la prefabricación y el empleo de recursos renovables contribuyen en la reducción del impacto medioambiental. En este contexto, la madera aparece como material renovable y ecológico y muy adecuado para obtener productos de construcción que permitan alto grado de prefabricación.

Dentro de las fases del ciclo de vida de estos productos de madera, la de fin de vida merece ser prestada especial atención. La degradación de la madera en un vertedero puede llegar a suponer el mayor impacto ambiental ocasionado por el producto. Afortunadamente, existen alternativas como la reutilización, el reciclaje y la incineración con recuperación de energía que minimizan este dato negativo.

Tener en cuenta todo el ciclo de vida de un producto desde la etapa inicial de diseño disminuye considerablemente las cargas ambientales, es precisamente por esto por lo que surge el ecodiseño. El ecodiseño facilita el reciclaje de la madera al eliminar reducciones dimensionales, lo que optimiza la pérdida de material y aumenta los escalones de utilización de la madera. Esto se consigue con un buen diseño de las piezas, teniendo en cuenta las dimensiones y los cortes. La utilización en cascada de un recurso (primero como material y por último como combustible) además aumenta el beneficio por unidad de recurso. Un caso de utilización en cascada de la madera es el sistema CaReWood, que emplea residuos de madera provenientes de la construcción para obtener productos de madera laminada. Es decir, amplía el tiempo de vida de esa madera añadiendo un escalón más tras su primera utilización y previo a su incineración. Sus contrastados beneficios económicos y medioambientales, hacen que este sistema sea un buen ejemplo de nueva forma de reciclaje de la madera dentro del marco de la economía circular.

Un producto de madera con alto potencial para su reutilización y reciclaje es el palé, ya que: son elementos estandarizados y son muy abundantes en todo el mundo. La industria del reciclaje de este producto experimenta un crecimiento continuo, pero no ha conseguido eliminar considerables problemas en los vertederos por la acumulación de palés. Por ello se hace necesario seguir profundizando en formas adicionales de reciclaje que integren el cascading. El concepto de cascading permite obtener otros

productos de construcción que supongan una revalorización de la madera obtenida. Esta valorización de la madera fomentaría aún más el reciclaje de palés minimizando los problemas de los vertederos y uso ineficiente del material.

Las formas propuestas de reaprovechamiento de la madera de palés se pueden clasificar en tres grupos: reutilización directa, reelaboración y regeneración de la materia prima. En la primera opción, el palé constituye en sí mismo el elemento constructivo, generando instalaciones de arquitectura efímera, estructuras, cerramientos de un edificio, refugios... La segunda emplea las partes desensambladas de los palés para generar materiales constructivos como paneles de entramado ligero, productos laminados o tableros CLT. Con la última, tras la trituración de los palés, se pueden fabricar tableros derivados de la madera ampliamente utilizados en construcción o proceder a la incineración para recuperar la energía.

Dentro de las tres opciones, se ha considerado especialmente interesante para su desarrollo la de reelaboración. Se trata de una opción de reciclaje aún con escasa investigación y desarrollo que, sin embargo, podría llegar a ser la de mayor beneficio económico y ambiental, al conseguirse productos de considerable calidad que permiten reducir el impacto ambiental. Uno de estos productos son los paneles CLT que optimizan las cuestiones dimensionales y de proceso de fabricación. Además, tienen gran interés en

el ámbito de desarrollo de nuevos materiales y procesos innovadores de construcción, que se complementa con su posible aplicación posterior a un desarrollo industrial en un contexto de ecodiseño y economía circular.

A las etapas habituales de fabricación de paneles CLT, habría que añadir unas previas de limpieza y adecuación dimensional de las tablas de los palés. Tras la obtención de este nuevo producto, sería indispensable realizar una serie de ensayos para obtener los datos de resistencia y durabilidad característicos del panel. Puesto que esta nueva propuesta de reciclaje trata de minimizar los impactos ambientales, sería también recomendable realizar un análisis del ciclo de vida.

A pesar de todas las ventajas medioambientales que este reciclaje de madera de palés puede suponer, el factor decisivo para su desarrollo es el económico. La comprobación de la viabilidad económica de este nuevo producto determinará su posterior desarrollo industrial.

En definitiva, la investigación necesaria para desarrollar productos ambientalmente sostenibles requiere de una adecuada financiación. En este escenario, la madera representa un material con indudables beneficios económicos, ambientales y sociales. El desarrollo de la bioeconomía va unida al aumento de la superficie arbolada del planeta, que a su vez contribuye a mejoras medioambientales, dinamiza el desarrollo del entorno rural, y favorece su uso como material de construcción.

Lista de referencias

Álvarez del Río, A. (2016) *El panel de madera contralaminada. Cerramiento ecoeficiente en España*. Trabajo fin de grado. Universidad de Valladolid.

Arias, J., Blanco, J. Pastor, P. Sánchez, P. y Sánchez, J. (2014) Sistema Valladolid de construcción con palets. EfimerARQ.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2003) *UNE-EN 13698-1:2003 Especificación para la producción de paletas. Parte 1: Especificación para la construcción de paletas planas de madera de 800 x 1200 mm*. Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2007) *UNE-EN 14040:2006 Gestión ambiental, Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2006) *UNE-ISO/TR 14062:2002 Integración de los aspectos ambientales en el diseño y desarrollo de productos*. Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2011) *UNE-EN ISO 14006:2011 Sistemas de gestión ambiental. Directrices para la incorporación del ecodiseño*. Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2012) *UNE-EN 15978:2012 Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo*. Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2015) *UNE-EN 13968:2015 Tableros derivados de la madera para utilización en la construcción. Características, evaluación de la conformidad y marcado*. Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2016) *UNE-EN 16351:2016 Estructuras de madera. Madera contralaminada. Requisitos*. Madrid: AENOR.

Araman, P.A., Bush, R.J., Hammet A.L., Hager, A.B. (1998) Wood pallets and landfills – Status and opportunities for economic recovery and recycling. *WASTECON World Congress 1998, SWANA's 36th Annual International Solid Waste Exposition*, Charlotte, North Carolina.

Basterra Otero, L.F., Balmori Roiz, J.A. (2018) *Maderas (I) Madera Laminada Encolada (MLE)*. Serie: Arquitectura. Manuales y textos Universitarios nº9. Ediciones Universidad de Valladolid. ISBN: 978-84-8448-960-3

Bhattacharjya, J., Kleine-Moellhoff, P. (2006) Environmental Concerns in the Design and Management of Pallets. *Collaborative Systems for Reindustrialization*, (Eds.), Springer, Berlin Heidelberg, pp.569–576.

Borrego Sánchez, L. (2015) *Arquitectura Low-Tech. Refugio de emergencia con palets*. Trabajo fin de grado. Universidad de Valladolid.

Bovea, M.D., Pérez-Belis, V. (2012) A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. *Journal of Cleaner Production*, 20, pp. 61-71.

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schinckhofer, G., Thiel, A. (2016) Cross-laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74, pp. 331-351.

Buehlmann, U., Bumgardner, M., Fluharty, T., (2009) Ban on landfilling of wooden pallet in North Carolina; an assessment of recycling and industry capacity. *Journal of Cleaner Production*, 17, pp. 271-275.

Bush, R.J., Reddy, V.S., Araman P.A. (Sin fecha) Pallets: A Growing Source of Recycled Wood. *Use of Recycled Wood and Paper in Building Applications*.

Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A. (2013) Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, pp. 379-388.

Carrano, A.L., Pazour, J.A., Roy, D., Thorn, B.K. (2015) Selection of pallet management strategies based on carbon emissions impact. *Int Journal Production Economics*, 164, pp. 258-270.

CEI-Bois (2009) Frente al cambio climático: Utiliza madera. ANFTA, Cis Madeira, Xunta de Galicia.

Chen, C.X., Pierobon, F., Ganguly, I. (2019) Life Cycle Assessment (LCA) of Cross-Laminated Timber (CLT) Produced in Western Washington: The Role of Logistics and Wood Species Mix. *Sustainability* 2019, 11.

Clarke, J.W., White, M.S., Araman, P.A. (2001) Performance of pallet parts recovered from used wood pallets. *Forest products journal*, 51 (2), pp. 55-62.

Comisión Europea (2008) "DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas." *Diario Oficial de la Unión Europea*, 22 de noviembre de 2008.

Comisión Europea (2013) "Una nueva estrategia de la UE en favor de los bosques y del sector forestal." *Comunicación de la comisión al parlamento europeo, el consejo, el comité económico y social europeo y el comité de las regiones*. Bruselas 20 de septiembre de 2013.

Comisión Europea (2015) "Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular." *Comunicación de la comisión al parlamento europeo, el consejo, el comité económico y social europeo y el comité de las regiones*. Bruselas, 2 de diciembre de 2015.

Comisión Europea (2016) CASCADES. 'Study on the optimised cascading use of wood'. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. ISBN: 978-92-79-57725-3

Comisión Europea (2019) "Intensificar la actuación de la UE para proteger y restaurar los bosques del mundo." Comunicación de la comisión al parlamento europeo, el consejo, el comité económico y social europeo y el comité de las regiones. Bruselas 23 de junio de 2019.

Comisión Europea, Dirección General de Energía y Transporte (2007) 2020 vision: Saving our energy. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.

Di Bella, A., Mitrovic, M (2020) Acoustic Characteristics of Cross-Laminated Timber Systems. *Sustainability* 2020, 12.

Falk, B. (1997) Opportunities for the Woodwaste Resource. *Forest Products Journal*, 47, pp. 17-23.

Fraanje, P. J. (1997) Cascading of pinewood. *Resources, Conservation and Recycling*, 19, pp. 21-28.

Hermida Balboa, C. y Domínguez Somonte, M. (2014) Economía circular como marco para el ecodiseño: el modelo ECO-3. *Informador Técnico (Colombia)*, 78, pp. 82-90.

Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Ritcher, K. (2014) Utilization of recovered wood in cascades versus utilization of primary wood—a comparison with life cycle assessment using system expansion. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, pp. 1755-1766.

Höglmeier, K., Steubing, B., Weber-Blaschke, G., Ritcher, K. (2015) LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood. *Journal of Environmental Management*, 152, pp. 158-170.

Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Ritcher, K. (2017) Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction—A case study for south-east Germany. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, pp. 304-314.

Husgafvel, R., Linkosalmi, L., Hughes, M., Kanerva, J., Dahl, O. (2018) Forest sector circular economy development in Finland: A regional study on sustainability driven competitive advantage and an assessment of the

potential for cascading recovered solid wood. *Journal of Cleaner Production*, 181, pp. 483-497.

Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (2006) *Guía general de buenas prácticas ambientales para el jefe de obra*. Barcelona: Servicio editorial del ItEC.

Karacabeyli, E. y Douglas, B. (2013) *CLT Handbook*. Point-Claire, QC, Canadá: FPInnovations.

Kim, M. H., Song, H. B. (2014) Analysis of the global warming potential for wood waste recycling systems. *Journal of Cleaner Production*, 69, pp. 119-207.

Klie, L (2005) Old pallets a problem? *Pool logistics*, statusreport, War enhousing.

Kosmol, J., Kanthak, J., Herrmann, F., Golde, M., Alsleben, C., Penn-Bressel, G., Schnitz, S., Gromke, U.:(2012) Glossar zum Ressourcenschutz; Umweltbundesamt; Dessau-Roßlau.

Llorente Díaz, I. M., (2011) *Análisis del ciclo de vida de la ventana de madera*. Trabajo Fin de Master. Universidad Politécnica de Madrid.

Mantau U, Saal U, Prins K, Steierer F, Lindner, M (2010) Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report. EUwood. Hamburg, Germany

Mazeika Bilbao, A., Carrano, A.L., Hewitt, M., Thorn, B.K. (2011) On the environmental impacts of pallet management operations. *Management Research Review*, 34, pp. 1222-1236

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014) *Plan de activación socioeconómica del sector forestal*.

Organización Interacional de Normalización (2003) *ISO 6780:2003 Flat pallets for intercontinental materials handling — Principal dimensions and tolerances*. Technical Committee ISO/TC 51

Parlamento Europeo (2014) "DIRECTIVA 2014/24/EU DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 26 de febrero de 2014 sobre contratación pública y por la que se deroga la Directiva 2004/18/CE"

Parlamento Europeo (2020). "La Unión Europea y los bosques" *Fichas técnicas sobre la Unión Europea – 2020*.

Parviainen, J., Bücking, W., Vandekerhove, K., Schuch, A., Päivinen, R. (2000) Strict forest reserves in Europe – Efforts to enhance biodiversity and

strengthen research related to natural forests in Europe. *Forestry*, vol. 73, n° 2.

Ramani, K., Ramanujan, D., Bernstein, W.Z., Sutherland, J., Handwerker, C., Choi, J., Kim, H., Thurston, D. (2010) Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review. *Journal of Mechanical Design*, 132.

Risse, M., Weber-Blaschke, G., Ritcher, K. (2017) Resource efficiency of multifunctional wood cascade chains using LCA and exergy analysis, exemplified by a case study for Germany. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, pp. 141-152.

Risse, M., Weber-Blaschke, G., Ritcher, K. (2019) Eco-efficiency analysis of recycling recovered solid wood from construction into laminated timber products. *Science of the Total Environment*, 661, pp. 107-119

Sánchez López, J., Sánchez López, P., Arias Madero, J. (2009) *Building with pallets Pallet Project*. Barcelona: Instituto Monsa de Ediciones. ISBN: 978-84-16500-00-0

Sathre R, Gustavsson L (2006) Energy and carbon balances of wood cascade chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 47, pp. 332–355.

Sikkema R, Junginger M, McFarlane P, Faaij A (2013) The GHG contribution of the cascaded use of harvested wood products in comparison with the use of

wood for energy—a case study on available forest resources in Canada. *Environmental Science & Policy*, 31, pp. 96-108.

Svajlenka, J., Kozlovská, M., Spisáková, M. (2017) The benefits of modern method of construction based on Wood in the context of sustainability. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, pp. 1591–1602.

Takano, A., Hafner, A., Linkosalmi, L., Ott, A., Hughes, M., Winter, S. (2015) Life cycle assessment of wood construction according to the normative standards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73, pp. 299–312.

Teischinger, A. and Kalcher, J. (2016) ERA-NET Wood Wisdom: Cascading Recovered Wood – Verwertbarkeit von Holz aus dem Sekundärwald. Viena: University of Natural Resources and Life Sciences.

Teischinger, A., Kalcher, J., Salzger, E., Praxmrrer, G., Vanek, M. (2016) general systematic for a design for recycling—guideline for wooden windows and wood aluminium Windows. *World Conference of Timber Engineering 2016*.

Tolosana, E. (2016) *Para una gestión forestal sostenible, más madera*. Madrid: Fundación del Valle de Salazar, Madrid. ISBN: 978-84-96442-68-9

Thonemann, N., Schumann, M. (2018) Environmental impacts of wood-based products under consideration of cascade utilization: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 172, p.p 4181-4188.

Tornese, F., Carrano, A., Thorn, B., Pazour, J., Dejjit, R. (2016) Carbon footprint analysis of pallet remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 126, pp. 630-642.

Van Uffelen, C. (2017) Remodeled, reused, recycled. Pallets 3.0. Architecture+design. Salenstein, Suiza: Braun Publishing AG. ISBN: 978-3-03768-211-1

Yeang, K. (1999) *Proyectar con la naturaleza. Bases ecológicas para el proyecto arquitectónico*. Barcelona: Gustavo Gili. ISBN: 84-252-2763-6

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Ec.europa.eu (2020) *Life Cycle Costing - GPP - Environment - European Commission*. [online] Disponible en: <<https://ec.europa.eu/environment/gpp/lcc.htm>> [Acceso 1 de septiembre 2020].

Egoin (sin fecha) [online] Disponible en: <<https://egoin.com/>> [Acceso 31 de agosto 2020].

Emedec (2020) *Tableros Derivados De La MADERA: Cuáles Son Y Cómo Elegirlos*. [Online] Disponible en: <<https://www.emedec.com/tableros-derivados-de-la-madera-cuales-son-y-como-elegirlos/>> [Acceso 26 de agosto 2020].

Horizonte2020. (2020) [online] Disponible en: <<https://eshorizonte2020.es/>> [Acceso 29 de agosto 2020].

Infomadera.net (sin fecha) *AITIM - Asociación De Investigación De Las Industrias De La Madera*. [online] Disponible en: <<https://infomadera.net/modulos/index.php>> [Acceso 1 de septiembre 2020].

Parlamento Europeo. 2018. *Economía Circular: Definición, Importancia Y Beneficios*. [online] Disponible en:

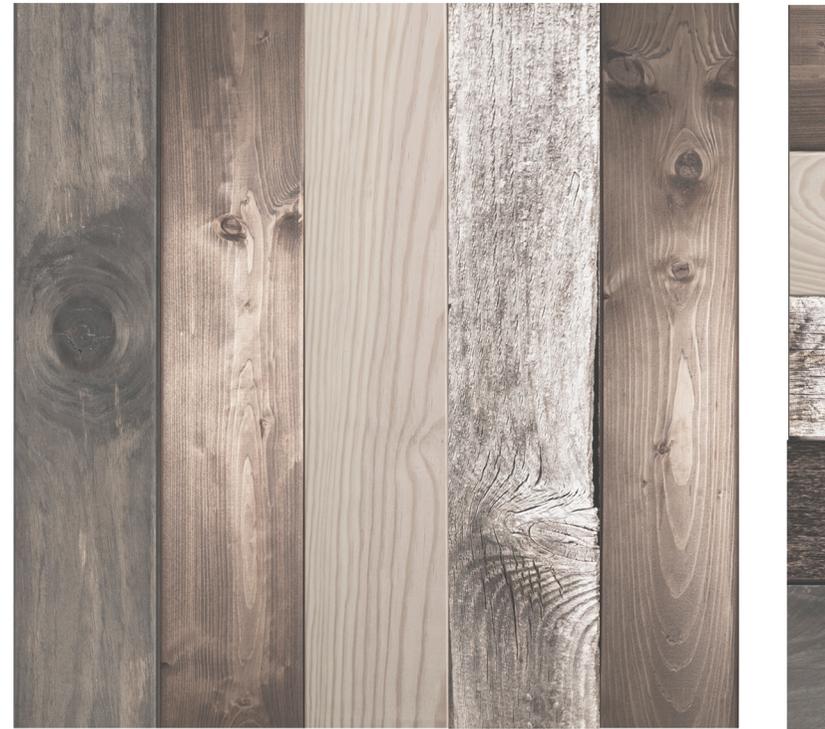
<<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20circular%20es%20un,de%20los%20productos%20se%20extiende.>> [Acceso 13 de septiembre 2020].

Pemade.com (sin fecha) [online] Disponible en: <<https://www.pemade.com/ensayos-para-madera-estructural>> [Acceso 2 de septiembre 2020].

Sánchez-Montañés Macías, B. (2020) *Arquitectura Bioclimática: Conceptos Y Técnicas / Ecohabitar*. [online] EcoHabitar. Disponible en: <<https://ecohabitar.org/arquitectura-bioclimatica-conceptos-y-tecnicas/>> [Acceso 28 de agosto 2020].

Weyerhaeuser (sin fecha) [online] Disponible en: <<https://www.weyerhaeuser.com/>> [Acceso 1 de septiembre 2020].

Wikipedia.org (2020) *Análisis De Ciclo De Vida*. [online] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_de_ciclo_de_vida> [Acceso 2 September 2020].



Universidad de Valladolid

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
ARQUITECTURA DE VALLADOLID.

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA
ARQUITECTURA.

TRABAJO FIN DE GRADO
SEPTIEMBRE 2020.