

Desafíos externos en el diseño de estructuras de madera: una revisión integral basada en la experiencia profesional

External challenges in the design of timber structures: A comprehensive review based on professional experience

David Mañes Navarrete^a, Ricardo Candel Gurrea^b, Adrián Sánchez Sevilla^c, Carlos Llopis Camps^d, Miguel Redón Santafé^e, Ignacio Payá Zaforteza^f

^a Estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Construcción. Universitat Politècnica de València. Ingeniero de estructuras. Sener Mobility S.A. david.manes@mobility.sener

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility S.A. Ingeniero de estructuras. ricardo.candel@mobility.sener

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility S.A. Ingeniero de estructuras. adrian.sanchez@mobility.sener

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility S.A. Jefe de disciplina de estructuras. carlos.llopis@mobility.sener

^e Dr. Ingeniero Agrónomo. Universitat Politècnica de València. Profesor permanente laboral. miresan@agf.upv.es

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dr. por la Universitat Politècnica de València, ICITECH. Catedrático de Universidad. igpaza@upv.es

RESUMEN

En la búsqueda de descarbonizar el sector de la construcción, la madera se presenta como una alternativa y complemento sostenible frente al hormigón y el acero, aunque plantea importantes desafíos para los ingenieros estructurales. Este artículo, a través de experiencia en proyectos reales, analiza los principales obstáculos en el diseño de estructuras de madera, como el coste, la resistencia al fuego, el comportamiento estructural, la durabilidad, el mantenimiento, el aspecto estético y el impacto ambiental. Además, aborda la necesidad de sensibilizar a arquitectos, promotores y otros actores sobre los beneficios de este material y el cambio de paradigma que implica su uso.

ABSTRACT

In the quest to decarbonize the construction sector, timber emerges as a sustainable alternative and complement to concrete and steel, although it poses significant challenges for structural engineers. This article, drawing from real project experiences, analyzes the main obstacles in the design of timber structures, such as cost, fire resistance, structural behavior, durability, maintenance, aesthetics, and environmental impact. Additionally, it highlights the need to raise awareness among architects, developers, and other stakeholders about the benefits of this material and the paradigm shift its use entails.

PALABRAS CLAVE: madera, diseño, desafíos.

KEYWORDS: timber, design, challenges

1. Introducción

El sector de la construcción es responsable de aproximadamente el 35% de las emisiones de CO₂ y del 45-65% de los residuos en vertederos [1]. Además, genera alrededor del 30% de los gases de efecto invernadero (GHG) globales [2] y consume un alto porcentaje de materiales como agregados, metales y materias primas [3]. En este contexto, y con el objetivo de avanzar hacia la descarbonización del sector, la madera se presenta como una alternativa estructuralmente eficiente y sostenible frente al hormigón y al acero. Productos derivados de la madera, como la madera contralaminada (CLT) y la madera laminada encolada (GLT), ofrecen importantes ventajas, incluyendo un menor carbono embebido, la capacidad de secuestrar carbono de la atmósfera, y el potencial para múltiples ciclos de reutilización y reciclaje [4]. Sin embargo, el uso de estos materiales debe integrarse y complementarse para maximizar sus respectivas ventajas y minimizar el impacto ambiental.

En los últimos años, el uso de la madera como elemento estructural ha ganado notable impulso en el sector, evidenciado por el aumento en el número de proyectos y de empresas especializadas en su producción, diseño y construcción en nuestro país. Este crecimiento ha fortalecido tanto el sector constructor enfocado en la madera como las ingenierías dedicadas al cálculo y diseño de estructuras de este material.

Desde una perspectiva de ingeniería, el diseño y cálculo de estructuras de madera presenta retos significativos para los ingenieros estructurales, quienes deben abordar diversos factores externos que inciden en su concepción,

diseño y aceptación como elemento estructural principal.

En el presente artículo, a partir de experiencias en proyectos reales, se exploran los principales obstáculos y retos enfrentados en la práctica profesional. Asimismo, se destacan las estrategias que los proyectistas pueden aplicar para superar barreras y promover entre todas las partes interesadas los beneficios de la madera como material estructural, así como sus cualidades sostenibles y su valor en la construcción moderna.

2. Análisis

Debido a la baja madurez de la madera como material estructural en la práctica de la ingeniería estructural en España, donde históricamente la arquitectura vernácula y profesional se ha decantado por otros materiales, es común tener que explicar y concienciar sobre aspectos fundamentales de la madera como material. A continuación, se desarrolla e ilustra de manera sucinta como se ha superado cada reto con su ejemplo aplicado en proyectos reales.

2.1 Coste

La madera, como material estructural, tiene un coste por unidad de volumen o capacidad resistente superior al de materiales convencionales como el hormigón y el acero. Este aspecto suele ser siempre la primera barrera en su elección en proyectos.

Sin embargo, sus características ofrecen una serie de beneficios que permiten reducir los costes en otras partidas del proyecto.

En primer lugar, el uso de la madera como elemento estructural puede disminuir los gastos en acabados, dado que su valor arquitectónico y estético permite que se utilice a la vista sin necesidad de revestimientos adicionales. Otro aspecto relevante es su ligereza frente al hormigón (5 kN/m³ frente a 25 kN/m³) y el acero (5 kN/m³ frente a 78.5 kN/m³), lo que permite disminuir las cargas sobre la cimentación, lo cual se traduce en una reducción de los costes de esta última partida. Este beneficio es particularmente relevante en terrenos con baja capacidad portante, donde es necesario recurrir a cimentaciones profundas o a mejoras del terreno, con coste elevado. Además, por ello, reduce el volumen de una de las partidas con mayor incertidumbre de información durante la redacción de los proyectos.

Otro aspecto a tener en cuenta es el menor tiempo de ejecución de las estructuras de madera en comparación con las de hormigón in situ, y en menor medida, con las de acero u hormigón prefabricado, lo cual contribuye a reducir los

costes fijos de la obra. La madera es un material que solo se concibe desde la industrialización y permite adoptar de manera sencilla y eficiente los nuevos enfoques que en este campo está desarrollando el sector de la construcción. En la Figura 1 se presenta una comparación realizada en la fase de valoración de alternativas entre una estructura de hormigón prefabricado y una estructura de madera para un proyecto real de oficinas, que finalmente no fue construido en madera.

Aunque la estructura de madera presenta inicialmente un coste superior, al considerar los ajustes en cimentación y acabados, la diferencia de coste se reduce considerablemente. Además, al evaluarlo en el contexto general del proyecto, el sobrecoste puede llegar a ser marginal. Esto convierte a la madera en una alternativa estructural altamente competitiva, considerando las múltiples ventajas que ofrece (ver Figura 2, donde se muestra una estructura de madera a la izquierda y una de hormigón a la derecha).

Comparación madera vs hormigón

	Estructura		Cimentación		Delta Revestimiento y fachada		TOTAL		DIFERENCIA		
	€	€/m ²	€	€/m ²	€	€/m ²	€	€/m ²	€	€/m ²	%
Madera	1,113,263 €	331 €/m ²	109,200 €	130 €/m ²	- €	0 €/m ²	1,222,463 €	364 €	306,619 €	91 €	33%
Hormigón pref.	541,853 €	161 €/m ²	182,650 €	217 €/m ²	191,340 €	57 €/m ²	915,843 €	273 €			

Comparación beneficio añadir estructura de madera respecto al resto de proyecto

Madera	Hormigón	Diferencia			
		Valor	Sobre STR	Sobre oficinas	Sobre TOTAL
1,222,463 €	915,843 €	306,619 €	33%	6%	3%

Figura 1. Comparación de coste entre estructura de madera y de hormigón en edificio de oficinas. Fuente: Elaboración propia

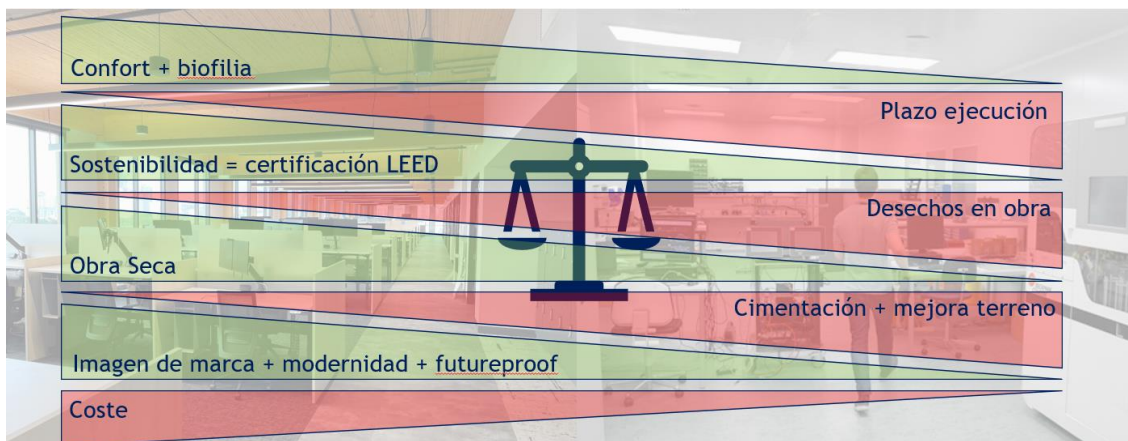


Figura 2. Comparación cualitativa de oficinas con estructura de madera y hormigón. Fuente: Elaboración propia

2.2 Resistencia frente al fuego

Existe un prejuicio común entre promotores y arquitectos sobre el uso de la madera por su comportamiento frente al fuego. Aunque es un material combustible, esta combustión no es rápida. Este aspecto fundamental en el enfoque de la resistencia al fuego no es tan conocido fuera del sector del diseño estructural.

Cuando la madera es expuesta a un incendio, la superficie se quema inicialmente con rapidez, formando una capa carbonizada. Debajo de esta capa se genera una zona en la que tiene lugar la pirólisis, un proceso químico que precede a la combustión.

Esta capa carbonizada actúa como un excelente aislante térmico, protegiendo el núcleo de la pieza y retrasando el aumento de temperatura en el interior. Como resultado, las propiedades físicas y mecánicas de la madera en la zona no afectada por el fuego se mantienen inalteradas. La pérdida de capacidad estructural de la madera se debe principalmente a la reducción de la sección transversal efectiva de la pieza y no a una disminución de la resistencia intrínseca del material.

En un concurso sea cabo una demostración gráfica y visual del comportamiento de la madera frente al fuego, comparando madera y el hormigón, para demostrar a los arquitectos y la propiedad de que el desempeño de la estructura no se vería comprometido por su inflamabilidad (ver Figura 3).



Figura 3. Ejemplo de comparación de comportamiento frente a fuego de hormigón, acero y madera. Fuente: Elaboración propia

2.3 Soluciones estructurales

Un aspecto esencial en el diseño de proyectos estructurales en madera es el trabajo mediante equipos multidisciplinares, ya que entran en juego factores diversos, como el transcurso de las instalaciones, acabados, estética, acústica, y comportamiento térmico, los cuales impactan directa o indirectamente en el diseño estructural.

La colaboración entre los equipos responsables de cada área resulta imprescindible para definir, desde las etapas iniciales, una estrategia integral que permita desarrollar estructuras limpias y funcionales.

En la práctica, se ejemplifica inicialmente esta colaboración con el diseño conjunto con el equipo de instalaciones. Se trata de un proyecto de centro sanitario con diseño de estructuras e instalaciones en construcción. En estos proyectos es habitual que los conductos de las instalaciones recorran las plantas por los pasillos y se conecten, desde los pasillos, a las habitaciones. El edificio cuenta con una estructura de muros y forjados de CLT, así como con unas vigas entre muros para apoyar el CLT de pasillos. Debido a las necesidades de falsos techos y volumen de instalaciones, mayor en pasillos que en habitaciones, las instalaciones deben pasarse enrasadas a los forjados CLT, no pudiendo descolgar las vigas de madera. Tras un debate interno, el problema se resolvió mediante una “viga peine” (Figura 4), que consiste en una viga de madera laminada con tacos de madera en la cara superior, permitiendo el paso de conductos entre ellos. Estas vigas servían de soporte para los forjados de CLT o TCC (Timber Concrete Composite), según las necesidades del proyecto, y la coordinación temprana con el equipo de instalaciones permitió

resolver este aspecto crítico sin recurrir a descuelgues ni perforaciones adicionales.

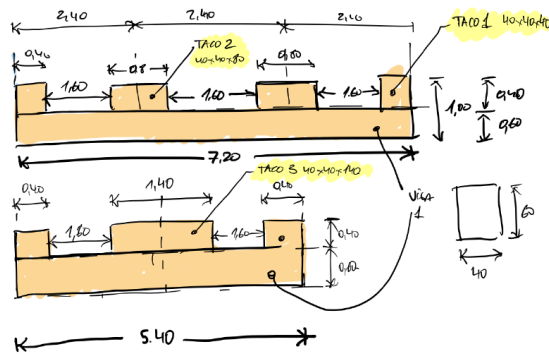


Figura 4. Geometría de "vigas peine". Fuente: Elaboración propia

Respecto a acabados, estética, acústica, comportamiento térmico y resistencia al fuego, estos factores son abordados conjuntamente por todas las disciplinas implicadas. En este proyecto, los muros portantes verticales consisten en paneles CLT, y la intención arquitectónica es que los paneles sean los elementos divisorios y acabados de las estancias, con lo que deben quedar vistos por ambas caras. Esto ofrece acabados de alta calidad y reduce los costes de revestimiento, ya que la propia estructura funciona como acabado final. Sin embargo, los muros de CLT del espesor especificado en el proyecto no cumplían con los requisitos de resistencia al fuego (R120) ni de aislamiento acústico. Aun aumentando el espesor de los paneles a 240 mm para cumplir la resistencia al fuego, no se alcanzaban los niveles necesarios de aislamiento acústico.

La solución final es el diseño de un panel sándwich compuesto por un panel CLT portante de 160 mm expuesto al fuego por una cara, 60 mm de aislamiento (por donde también pasan pequeños conductos de instalaciones) y 80 mm de CLT no portante, que actúa como acabado y protección al fuego para el panel CLT estructural (ver Figura 5). Esta solución es posible gracias a la estrecha colaboración entre los equipos de arquitectura, estructuras, instalaciones y acústica.

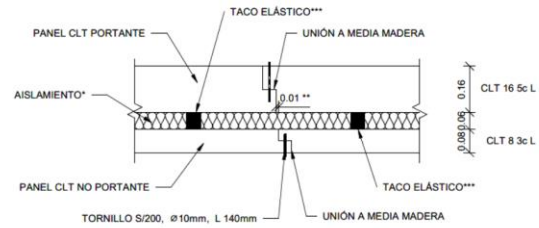


Figura 5. Detalle estructura panel sándwich. Fuente: Elaboración propia

Estos ejemplos subrayan la importancia de contar con equipos multidisciplinares en el diseño de estructuras de madera, permitiendo maximizar la versatilidad del material y desarrollar estructuras sencillas y funcionales.

2.4. Durabilidad, mantenimiento y procedencia de la madera

La durabilidad natural de la madera se define como su resistencia intrínseca, sin necesidad de tratamientos adicionales, frente al ataque de agentes xilófagos. Esta propiedad varía significativamente entre especies, y también dentro de la misma especie, dependiendo de su origen y de su parte específica. Existe la percepción errónea de que la madera es menos durable que materiales como el acero o el hormigón. Sin embargo, todos estos materiales se ven afectados por factores de deterioro: la corrosión en el acero y la carbonatación en el hormigón, mientras que la madera, con un diseño adecuado y medidas de protección apropiadas, puede evitar estos problemas y conservarse en buen estado durante siglos. Ejemplo de ello es el templo budista Horyu-ji en Japón, construido hace más de 1.400 años y cuya estructura de madera sigue en pie [5].

Aunque la madera ha demostrado ser durable cuando se aplican diseños y protecciones adecuados, es cierto que su durabilidad y apariencia varían según la especie y las condiciones de uso. Este aspecto es fundamental tanto desde el punto de vista estructural como arquitectónico (por su aspecto estético) al seleccionar la especie de madera. En la Figura 6,

se presenta una infografía elaborada en un concurso para asesorar al equipo de arquitectura sobre la elección de maderas adecuadas para uso exterior, evaluadas en función de su coste, mantenimiento, origen y huella de carbono

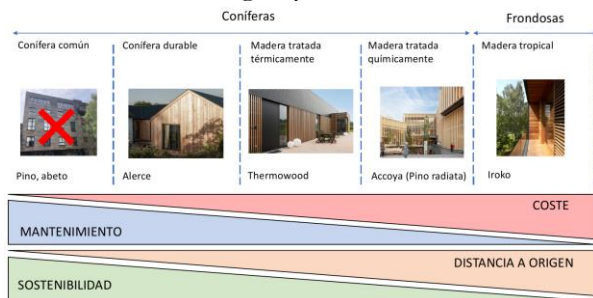


Figura 6. Comparación de especies de madera para su uso en exterior. Fuente: Elaboración propia

En cuanto al mantenimiento, es un aspecto esencial para garantizar la durabilidad de la madera a largo plazo. Aunque este punto es ampliamente conocido en el ámbito de la ingeniería estructural, es fundamental considerarlo en el presupuesto de la obra. Esto incluye el lijado de las piezas tras su instalación, la aplicación de tratamientos como cera, pintura o barniz, así como la realización de revisiones periódicas. Además, es necesario realizar un control de posibles humedades y de plagas que puedan afectarla durante su vida útil. Estas acciones preventivas deben ser incluidas en los presupuestos elaborados cuando se proyectan estructuras de madera, para asegurar su conservación y prolongar la vida útil de las instalaciones.

2.5. Estética

Aunque la estética no es una preocupación directa del cálculo estructural, juega un papel clave en el diseño de estructuras de madera y en concreto en proyectos de edificación, donde la tendencia actual es apostar cada vez más por elementos de madera vistos.

En este contexto, surgen preguntas comunes por parte de promotores y arquitectos sobre la apariencia de la madera en función de su calidad (vista o no vista, calidad 1, 2 y 3, etc.), el aspecto de las juntas y las uniones. La solución

más efectiva para resolver estas inquietudes es la visita a obra, especialmente si aún está en construcción, ya que permite observar la estructura sin los revestimientos.

Esta estrategia ha demostrado ser muy satisfactoria, ya que proporciona una visión real de la estética de la madera y resuelve las dudas de manera directa. No obstante, en fases más tempranas del proyecto o en concursos, donde la visita a obra no es viable, el uso de infografías puede ser una herramienta útil. Un ejemplo de ello es el uso de infografías en un concurso para un centro logístico y de oficinas, como se ilustra en la Figura 7.



Figura 7. Comparación estética de tipos de madera. Fuente: Stora Enso [6]

Otro ejemplo de la estrecha relación entre la estética y la estructura se observa en la Figura 8. En este concurso, la estructura fue inicialmente diseñada como una cercha metálica con un forjado de entramado de madera, con la previsión de ser revestida con un acabado de madera. Sin embargo, a propuesta del equipo de estructuras, se optó por sustituirla por un sistema de lámina plegada con CLT y tirantes metálicos, donde la propia estructura también sirviera de acabado. Esta solución no solo permitió eliminar el coste adicional de los revestimientos, sino que también aportó una estética más refinada,

transmitiendo una imagen de mayor nobleza y singularidad a la estructura.



Figura 8. Comparación de coste entre estructura de madera y de hormigón en edificio de oficinas. Fuente: Elaboración propia

2.6. Carbono embebido

La madera es ampliamente reconocida como un material con bajo carbono embebido, que además secuestra carbono de la atmósfera. Este uno de los grandes impulsores del uso de madera como material estructural y es especialmente relevante en las fases iniciales de los proyectos, cuando se valoran distintas alternativas en cuanto a materiales para la estructura.

En este sentido, resulta crucial tener en cuenta las diferentes fases para la valoración de la huella de carbono, conforme a la norma UNE 15804 [7]. En este marco, las fases que se pueden evaluar incluyen A1-A3 ("de la cuna a la puerta"), A1-A5 ("de la cuna a la finalización de la obra"), A1-C4 ("de la cuna a la tumba") y A1-D ("de la

cuna a la cuna"). En la madera, además, existe el componente del carbono biogénico (carbono secuestrado de la atmósfera), que cuenta en negativo.

Sin embargo, persiste un debate sobre si este carbono debe ser descontado de los cálculos, dado que depende del destino final de la madera. En caso de que esta se queme, el carbono secuestrado regresa a la atmósfera.

La Figura 8 ilustra un análisis comparativo de alternativas para un concurso de centro logístico y de oficinas. En este estudio, se evalúa la huella de carbono de una estructura de madera frente a una de acero, que incluye también el acero XCarb (acero de bajas emisiones), en las fases A1-A3, sin considerar el carbono biogénico debido a la incertidumbre acerca del destino final de la estructura.

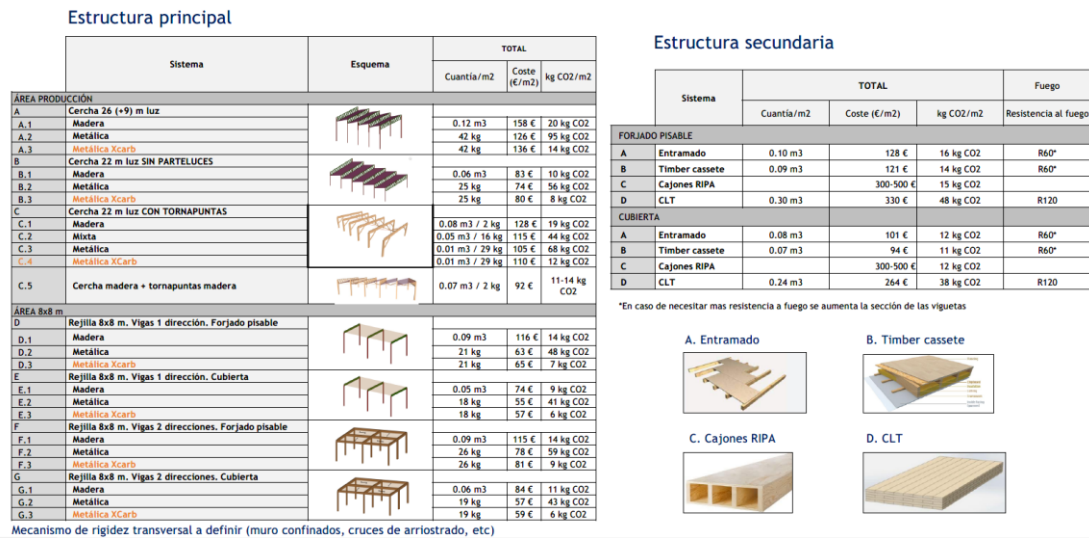


Figura 9. Comparación de huella de carbono de alternativas estructurales en centro logístico y de oficinas. Fuente: Elaboración propia

El análisis concluye que, aunque la estructura de madera es competitiva en términos de emisiones de CO₂ y coste, en ciertos casos puede ser más ventajoso combinar materiales, como por ejemplo, usar acero de bajas emisiones para la estructura principal y madera para la secundaria. Este tipo de decisiones, que no son exclusivamente estructurales, deben ser evaluadas de manera multidisciplinar, considerando factores técnicos, económicos y medioambientales.

Se realizó un análisis similar para un proyecto de oficinas mencionado, actualmente en construcción, que se presenta en la Figura 9. En este caso, el uso de madera como material estructural reduce la huella de carbono en un 52% en comparación con una estructura de hormigón prefabricado. Este ahorro se debe, además de a la menor huella de carbono del material en sí, a la reducción de la cimentación requerida para las estructuras de madera, que en el caso de las de hormigón prefabricado es mayor, lo que incrementa aún más la huella de carbono asociada.

Comparación madera vs hormigón

	Estructura		Cimentación		TOTAL		DIFERENCIA		
	Tn CO ₂	kg CO ₂ /m ²	Tn CO ₂	kg CO ₂ /m ²	Tn CO ₂	kg CO ₂ /m ²	Tn CO ₂	kg CO ₂ /m ²	%
Madera	196 Tn CO ₂	58 kg CO ₂ /m ²	131 Tn CO ₂	157 kg CO ₂ /m ²	328 Tn CO ₂	98 kg CO ₂ /m ²			
Hormigón pref.	336 Tn CO ₂	100 kg CO ₂ /m ²	162 Tn CO ₂	192 kg CO ₂ /m ²	498 Tn CO ₂	148 kg CO ₂ /m ²	170 Tn CO ₂	51 kg CO ₂ /m ²	52%

Figura 10. Comparación de huella de carbono de alternativas estructurales en edificio de oficinas. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en los últimos años, varios países europeos, como Dinamarca, Países Bajos, Finlandia y Francia, han establecido límites en las emisiones de carbono para los nuevos proyectos de construcción [8], lo que implica que la implementación de estas normativas en España es solo cuestión de tiempo. Además, se han presentado iniciativas como la de Galicia, que en 2023 presentó una guía para el fomento de la madera en la contratación pública [9].

2.7. Certificaciones

Un aspecto crucial a considerar en casi cualquier proyecto de construcción es la obtención de certificaciones medioambientales, las cuales avalan el cumplimiento de estándares de

sostenibilidad. En este contexto, la utilización de madera como material estructural tiene un impacto positivo en la puntuación obtenida en diversas certificaciones. Aunque se sabe que la madera contribuye a una mejor evaluación en estos procesos, una pregunta recurrente en proyectos es cómo y en qué medida afecta a la puntuación total de las certificaciones. Esta ha sido una consulta frecuente en varios proyectos con distintas certificaciones.

Para abordar esta cuestión, se realizó un estudio comparativo sobre el impacto de la estructura en diferentes sistemas de certificación, como BREEAM, LEED o Envision, cuyos resultados se resumen en la Figura 10. Este análisis revela que el impacto de la estructura de madera en las puntuaciones obtenidas en estas certificaciones es bastante similar entre ellas.

BREEAM (>564.000 cert)			LEED (>108.000 cert)			Envision (>300 certificaciones)		
Crédito	Puntos	Estrategia estructuras	Crédito	Puntos	Estrategia estructuras	Crédito	Puntos	Estrategia estructuras
Materiales/productos con EPD	0-6	Uso de materiales con Declaración Ambiental de Producto	Reducción del impacto del ciclo de vida del edificio	0-5	Uso de materiales con baja huella de carbono, estructuras desmontables, materiales reciclados, etc	Reducir el carbono neto incorporado	0-20	Realizar soluciones estructurales con menor carbono embebido
Madera aprovisionada y comercializada legalmente	0-3	Uso de madera comercializada legalmente y aprovisionamiento correcto	Revelación y optimización de los productos del edificio - Declaraciones Ambientales de Producto	0-2	Uso de materiales con Declaración Ambiental de Producto	Establecer objetivos y estrategias de resiliencia	0-20	Proyectar estructuras resilientes
Áridos reciclados	0-1	Uso de áridos reciclados	Revelación y optimización de productos del edificio - Fuentes de Materias Primas	0-2	Uso de productos con Informes de Sostenibilidad, FSC (madera), reutilizados, etc	Maximizar la resiliencia	0-20	Proyectar estructuras resilientes
Diseño orientado a la protección contra el impacto	0-1	Diseño con condiciones adecuadas y de protección contra el impacto	Revelación y optimización de productos del edificio - Componentes de los Materiales	0-2	Uso de materiales con información sobre sus componentes	Innovar o superar los requisitos de los créditos	0-10	Aplicación de un desarrollo potente
Gestión de residuos de la construcción	0-3	Proyectar estructuras que generen pocos residuos (prefabricación)	Gestión de residuos de construcción y demolición	0-2	Uso de estructuras que no generan apenas residuos al final de su vida útil, se reutilizan, prefabricación	Utilizar materiales reciclados	0-16	Utilizar materiales reciclados
TOTAL	14	s/130 (11%)	TOTAL	13	s/110 (12%)	Reducir los residuos durante la explotación de la infraestructura	0-14	Proyectar estructuras que generen pocos residuos
						Reducir los residuos durante la construcción	0-14	Proyectar sistemas constructivos que generen pocos residuos (prefabricación)
						Equilibrar el movimiento de tierras	0-8	Minimizar el movimiento de tierras
						TOTAL	122	s/1000 (12%)

Figura 11. Comparación de huella de carbono de alternativas estructurales en edificio de oficinas. Fuente: Elaboración propia

El uso de madera certificada, como la que cuenta con un EPD (Declaración Ambiental de Producto) y las certificaciones PEFC o FSC, tiene un impacto positivo en varios aspectos clave de estas certificaciones. Entre los beneficios más destacados, se incluyen como materiales/productos con EPD, diseño orientado a la protección contra el impacto, reducción del impacto del ciclo de vida del edificio, revelación y optimización de productos del edificio, reducir el carbono neto incorporado, entre otros.

Este análisis refleja el potencial de la madera para contribuir significativamente a la sostenibilidad en la construcción y, por ende, al logro de una mejor puntuación en las certificaciones medioambientales.

3. Conclusión

El uso de la madera como material estructural presenta importantes retos, pero también oportunidades significativas para el diseño de estructuras sostenibles y eficientes. Este artículo ha abordado, a través de la experiencia práctica, los principales obstáculos que enfrentan los ingenieros estructurales en la implementación de estructuras de madera.

En primer lugar, se ha identificado que, a pesar de que la madera presenta un coste unitario más alto frente a hormigón y acero, sus ventajas en términos de ahorro en cimentación, acabados y tiempos de ejecución pueden hacer que el coste total de la construcción sea competitivo. Además, se destaca la bondad de combinar la madera con el hormigón y acero, para optimizar el aprovechamiento de las propiedades de cada material.

A su vez, las propiedades de la madera frente al fuego y su durabilidad, cuando se diseñan y protegen adecuadamente, refutan los prejuicios comunes sobre su seguridad y resistencia a lo largo del tiempo. Además, se destaca que la colaboración multidisciplinaria en el diseño de estructuras de madera es crucial para optimizar su versatilidad y funcionalidad, abarcando no solo el comportamiento estructural sino también los aspectos acústicos, térmicos y estéticos.

Otro desafío importante es la percepción negativa sobre la durabilidad de la madera, que puede ser superada mediante un diseño adecuado y el uso de especies de alta calidad. En cuanto a la sostenibilidad, la madera presenta una ventaja innegable debido a su bajo carbono embebido y su capacidad para secuestrar carbono, lo que la convierte en un material clave para la construcción sostenible. Además, el impacto positivo de la madera en las

certificaciones medioambientales, como BREEAM y LEED, destaca su papel en la promoción de una construcción más verde y responsable.

Finalmente, los avances en normativas ambientales y los incentivos en países europeos refuerzan la tendencia hacia el uso de la madera, destacando su potencial para contribuir significativamente a la descarbonización del sector de la construcción. A medida que crece la aceptación de la madera como material estructural en España, la superación de estos desafíos permitirá su integración más amplia en proyectos de construcción, con el objetivo de crear espacios más sostenibles y eficientes.

Referencias

- [1] Ahmad, W., Ahmad, A., Ostrowski, K. A., Aslam, F., & Joyklad, P. (2021a). A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00683
- [2] Zea Escamilla, E., Habert, G., Correal Daza, J., Archilla, H., Echeverry Fernández, J., & Trujillo, D. (2018). Industrial or Traditional Bamboo Construction? Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Bamboo-Based Buildings. *Sustainability*, 10(9), 3096.
- [3] Ajayabi, A., Chen, H.-M., Zhou, K., Hopkinson, P., Wang, Y., & Lam, D. (2019). REBUILD: Regenerative Buildings and Construction systems for a Circular Economy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225, 012015.
- [4] Irle, M. (2015). *Intelligent recycling of solid wood*. ONLINE ISSN 2069-7430 ISSN-L 1841-4737. Vol. 11 N° 4 2015. pp. 14-20.
- [5] Embury-Williams, L & Karacabey, E (2015). Application of Analysis Tools from NEWBuildS Research Network in Design of a High-Rise Wood Building. *NSERC Strategic Research Network on Innovative Wood Products and Building Systems (NEWBuildS)*.
- [6] Stora Enso Wood Products. Building Solutions (2021). Annual report 2021. Finlandia
- [7] Asociación Española de Normalización y Certificación (2014). *UNE-EN 15804:2012+A1:2014. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción*.
- [8] OneClick LCA (2022). Construction carbon regulations in europe review & best practices. Netherlands
- [9] Centro de innovación y servicios tecnológicos de la madera de galicia (CIS – Madera) perteneciente a la Agencia Gallega de la Industria Forestal (2023). Guía para el fomento de la madera en la contratación pública de edificaciones sostenibles