

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Uso de Mass Timber Construction en Edificios Altos: Una
Revisión**

Ariel Andrés Saá Rubio

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito

para la obtención del título de

Ingeniero Civil

Quito, 21 de diciembre de 2022

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

Uso de Mass Timber Construction en Edificios Altos: Una Revisión

Ariel Andrés Saá Rubio

Nombre del profesor, Título académico

Miguel Andrés Guerra, PhD

Quito, 21 de diciembre de 2022

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos:	Ariel Andrés Saá Rubio
Código:	00207088
Cédula de identidad:	1719144808
Lugar y fecha:	Quito, 21 de diciembre de 2022

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

El mass timber construction (MTC) se presenta como una alternativa de material de construcción a los tradicionales como el hormigón y el acero. El artículo presenta una revisión literaria sistemática de MTC donde se revisaron 23 documentos. Dentro del alcance de esta revisión se presenta las dimensiones recomendadas para los elementos principales del MTC, uso de estos elementos y también se señala temas esenciales relacionados al MTC como el tipo de árboles a utilizar, contenido de humedad, conexiones y resistencia al fuego. Los resultados se muestran como tablas donde se detallan las fuentes con su correspondiente recurso electrónico, de tal manera que este paper pueda ser replicado, sirva como primer contacto con el tema o ayude a cualquier interesado a profundizar en el tema con ayuda de las fuentes.

Palabras clave: mass timber construction (MTC), cross-laminated timber (CLT), Glue-Laminated Timber (Glulam), Dowel-Laminated Timber (DLT), nail-laminated timber (NLT), laminated veneer lumber (LVL), resistencia al fuego, control de humedad y detalles de conexión.

ABSTRACT

Mass timber construction (MTC) is presented as an alternative construction material to traditional ones such as concrete and steel. The article presents a systematic literary review of MTC where 23 documents were reviewed. Within the scope of this review, the recommended dimensions for the main elements of the MTC, the use of these elements are presented, and essential issues related to the MTC are also indicated, such as the type of trees to be used, moisture content, connections and fire resistance. The results are shown as tables where the sources are detailed with their corresponding electronic resources, in such a way that this paper can be replicated, serve as a first contact with the subject or help anyone interested in delving into the subject with the help of the sources.

Keywords: mass timber construction (MTC), cross-laminated timber (CLT), glue-laminated timber (Glulam), dowel-laminated timber (DLT), nail-laminated timber (NLT), laminated veneer lumber (LVL), fire resistance, moisture control and connection details.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
DESARROLLO DEL TEMA.....	15
OBJETIVO	25
METODOLOGIA	25
RESULTADOS.....	28
DISCUSIÓN	32
CONCLUSIONES.....	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de la revisión bibliográfica de artículos relacionados con los componentes del MTC.	29
Tabla 2. Resultados de la revisión bibliográfica de temas esenciales sobre MTC.	30

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Productos de mass timber construction.....	13
Ilustración 2. Layup estándar de Glulam	15
Ilustración 3. Layup de CLT para diferentes propósitos.....	17
Ilustración 4. Nail-Laminated Timber (NLT)	18
Ilustración 5. Dowel-Laminated Timber (DLT)	18
Ilustración 6. Profundidad de carbonización efectiva.....	23

INTRODUCCIÓN

La urbanización comprende un proceso de transformación tanto económica como social, ya que no se trata sólo del desplazamiento de personas de las zonas rurales a las urbanas, sino también del sistema económico que pasa de la agricultura a la industria. Las últimas décadas muestran un rápido proceso de urbanización, tanto que la población urbana mundial ha aumentado de 751 millones en 1950 a 4.200 millones en 2018 y en los próximos 30 años se estima que esta cifra alcanzará los 6.400 millones. En 2013, las ciudades consumieron el 64% de la energía mundial y emitieron más del 72% del dióxido de carbono (CO₂) global (Muhammad et al., 2020). Se cree que tres cuartas partes de las emisiones globales de gases de efecto invernadero están representadas por CO₂, por lo que se considera el gas responsable del cambio climático (Nejat et al., 2015). Los cambios de temperatura, la precipitación y la concentración de CO₂ son factores clave del cambio climático, por lo que esta es una gran amenaza para la seguridad alimentaria y mantener el suministro de agua y alimentos es uno de los principales desafíos de la humanidad en el siglo XXI (Zhang et al., 2022). La actividad humana es una de las causas más significativas de impacto ambiental, esto como producto del conflicto entre mantener y utilizar el medio ambiente, esto significa desarrollo, construcción, urbanización, explotación de recursos a expensas de la integridad de los recursos ambientales (Vélez-Aspiazú & Coello-Espinoza, 2017).

La industria de la construcción desempeña un papel clave en la economía mundial, así como en el desarrollo social y económico (Ofori, s.f.). El sector de la construcción

proporciona infraestructura y lugares de vida a las personas, sin embargo, al ser parte del proceso de industrialización y urbanización, se ha convertido en uno de los objetivos destacados para la reducción del impacto ambiental, esto porque representa un tercio del consumo total de energía en el mundo y contribuye con el 15% de las emisiones directas de CO₂ (Duan et al., 2022). Así también, consume grandes cantidades de energía no renovable, esa es la razón de la generación de grandes emisiones de CO₂. En 2009, el CO₂ total emitido por el sector de la construcción fue de 5,7 millones de toneladas, contribuyendo así con el 23% de las emisiones totales de CO₂ para las actividades económicas mundiales (Huang et al., 2018). En cuanto a las emisiones de carbono, se reporta que China es el país con mayores emisiones desde 2013, esto debido a su rápida urbanización, entre 2011 y 2013 China produjo un promedio de 9 a 10.2 billones de toneladas de CO₂ al año, lo que equivale al 28% de las emisiones globales, desde entonces las emisiones producidas por este país han aumentado en 2017 al 30% y se espera que para 2030 esta cifra aumente a 13.200 millones de toneladas (Chai et al., 2022). Particularmente la producción de concreto, uno de los materiales más utilizados en la construcción, emite una gran cantidad de CO₂, comenzando con la producción de cemento, agregados y aditivos hasta la etapa de producción (Kim et al., 2013). Como respuesta a todos estos problemas globales, en 2015 la Organización de las Naciones Unidas propusieron los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible orientados al cuidado y preservación del medio ambiente, así como a la prosperidad económica y social a nivel mundial (PNUD, 2015).

Dentro del sector de la construcción, una alternativa viable alineada con los objetivos actuales de la humanidad es el uso de la madera en la construcción, y a pesar de ser un material que se ha utilizado durante cientos de años en la industria, en los últimos años se ha dejado de lado. En los últimos años, se han producido desarrollos técnicos de este material para ser utilizado como reemplazo de estructuras de hormigón y acero (Crawford & Cadorel, 2017). Uno de esos avances en la tecnología ha desarrollado un producto llamado Mass Timber Construction (MTC). MTC es un término utilizado para describir un grupo de elementos de madera que tienen una aplicación estructural para la construcción de edificios, además de ser una alternativa para reemplazar el uso del hormigón y el acero en la industria. Uno de los muchos beneficios de MTC es que es un material de construcción renovable que no solo reduce las emisiones, sino que incluso crea emisiones negativas al secuestrar carbono (Abed et al., 2022). La construcción masiva de madera es un potencial alternativo para hacer frente a los problemas actuales que enfrenta el sector de la construcción, al tiempo que puede satisfacer las necesidades de la sociedad actual, como el aumento de la altura en los edificios, la velocidad de construcción y la resistencia al fuego (Crawford & Cadorel, 2017). Ejemplos reales de esto son el Ascent Building (86.6 [m]), Brock Commons Tallwood House (53 [m]), Mjøstårnet (85 [m]), entre otros ejemplos que se pueden señalar.

Los productos que componen el MTC son los siguientes bloques de construcción (Ilustración. 1), estos elementos se dividen en 2 subgrupos, el primero es la Madera Acerrada Maciza (MAM) donde se encuentra: Cross-Laminated Timber (CLT), Glue-

Laminated Timber (Glulam), Dowel-Laminated Timber (DLT) y Nail-Laminated Timber (NLT). El segundo grupo se denomina Madera Compuesta Estructural (MCE) donde se tiene: Laminated Veneer Lumber (LVL), Laminated Strand Lumber (LSL), Parallel Strand Lumber (PSL) and Mass Plywood Panel (MPP). Los productos MTC se pueden utilizar en diversas aplicaciones y son la base de sistemas de construcción de madera más altos (*British Columbia Forest Wood & Mass Timber Products, s.f.*).

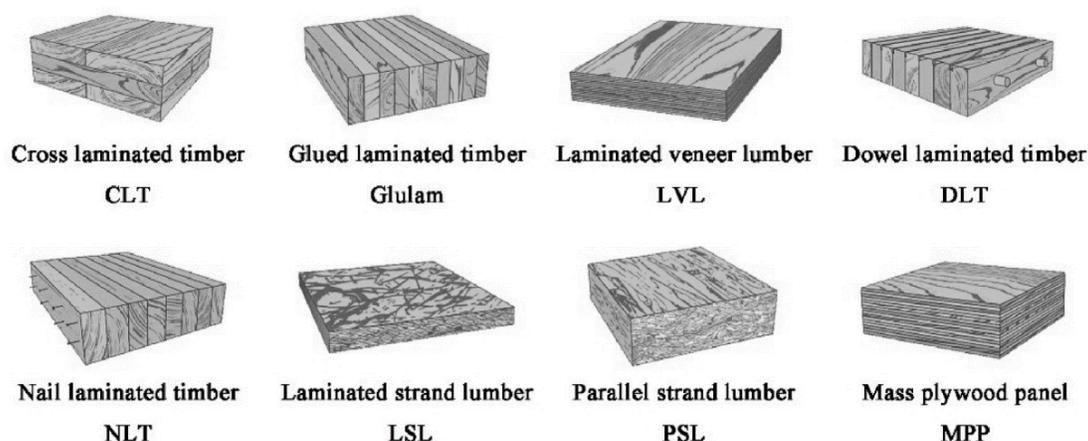


Ilustración 1. Productos de mass timber construction. (British Columbia Forest Wood & Mass Timber Products, s.f.).

A grandes rasgos, este documento se centra en hacer una revisión literaria del Mass Timber Construction, centrándose en 5 de los 8 productos MTC mostrados en (Ilustración. 1), siendo estos todos los que componen el subgrupo MAM y solo LVL como elemento del subgrupo MCE por ser el más relevante de este tipo al poder ser utilizado para diferentes propósitos. Para el análisis, los productos MTC se distinguen

en 3 categorías diferentes en función de su función dentro del edificio, estas son (1) MAM: Estructural, (2) MAM: Paredes, Piso y Techo y (3) MCE: Multipropósito. El documento abordará 2 segmentos, el primero será una descripción de los 5 componentes del MTC, detallando sus dimensiones típicas y el tipo de uso que se le puede dar al elemento y el segundo será un detalle de temas esenciales cuando se trata de MTC.

DESARROLLO DEL TEMA

El primer tipo es **Glue-laminated timber (Glulam)**, que es el único elemento que compone la categoría (1) MAM: Estructural. Se compone de laminaciones de madera que se unen entre sí con adhesivos duraderos y resistentes a la humedad y estas laminaciones son siempre paralelas entre sí. Las láminas pueden tener espesores que van desde 3.5 [cm] a 3.8 [cm], mientras que el grosor total de un elemento Glulam puede variar de 6.35 [cm] a 27.5 [cm] (APA, 2017). El uso principal que se le da a este elemento es de tipo estructural, es decir que puede utilizarse tanto como viga como columna, dentro de la fabricación de estas se busca colocar las láminas más resistentes en la parte superior e inferior de la viga, ya que son las zonas donde se realizan los esfuerzos de compresión y máxima tensión de tal manera que la viga como se muestra en la (Ilustración. 2). Este concepto permite que la madera se utilice de manera eficiente ya que las que tienen mayor resistencia se utilizan dónde están presentes las mayores tensiones y se pueden utilizar las de menor resistencia donde el esfuerzo es menor (APA, 2019c).

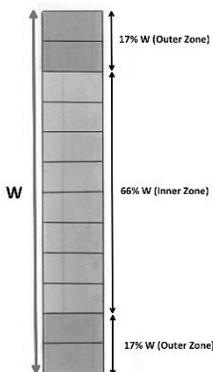


Ilustración 2. Layup estándar de Glulam.

Los valores recomendados con relación a la (Ilustración. 2) para las láminas sometidas a compresión y tensión, considerando una longitud W , las capas deben distribuirse de tal manera que de arriba a abajo sea 17% W , 66% W y 17% W (Swedish Wood, 2022).

La segunda categoría se centra en describir aquellos productos MTC que se pueden utilizar en la construcción con la función de paredes, pisos y techos. **Cross-Laminated Timber (CLT)** se compone de al menos 3 capas de tableros que se colocan transversalmente de una capa a otra, formando así un ángulo de 90 grados, estos se unen mediante adhesivos duraderos y resistentes a la humedad. Lo más común dentro de un elemento CLT es tener de 3 a 7 capas de tablero, estas tienen dimensiones que varían entre 16 [mm] y 51 [mm], formando así anchos totales que van de 6 [cm] a 24 [cm] típicamente, mientras que su longitud puede ser de hasta 18 [m] (Karacabeyli & Gagnon, 2019).

CLT se puede utilizar para una variedad de cosas, como elementos de piso o techo, secciones de pared, pisos en voladizo, huecos de ascensores, escaleras y también como paredes estructurales y no estructurales (APA, 2019a). Un ejemplo del número de capas y espesores posiblemente necesarios dependiendo del objetivo con el que se utilizará el CLT se muestra en (Ilustración. 3), donde se muestran 3 escenarios diferentes de conformación CLT.

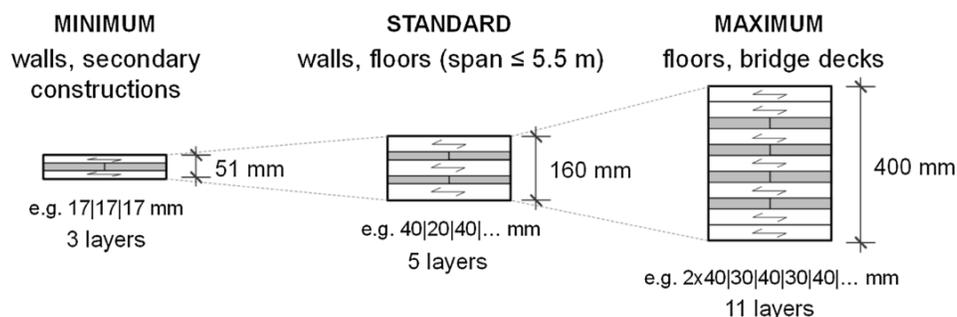


Ilustración 3. Layup de CLT para diferentes propósitos. (Brandner et al., 2016).

Una cosa a tener en cuenta para maximizar la capacidad de carga del elemento es que cuando se utiliza CLT para paredes, las capas exteriores deben ubicarse de tal manera que estén en la misma dirección que la carga gravitacional y de la misma manera en el caso de un piso o techo, las capas externas son paralelas a la longitud de las vigas estructurales (Karacabeyli & Gagnon, 2019).

El segundo elemento, **Nail-Laminated Timber (NLT)**, se crea a partir de la colocación de láminas de madera con dimensiones que pueden ser 38 [mm], 64 [mm] u 89 [mm], generando espesores totales del elemento que pueden variar de 8.9 [cm] a 28.6 [cm]. A diferencia de otros elementos que forman parte del MTC, éste no tiene sus láminas unidas por algún adhesivo resistente, sino que la unión entre láminas se realiza a base de clavos como se muestra en la (Ilustración. 4) (Binational Blandwood Lumber Council and Forestry Innovation Investment Ltd., 2017). Hay varias aplicaciones que se pueden dar al NLT, entre estas se encuentran pisos, techos, paredes, huecos de ascensores y escaleras. Una ventaja del NLT es que, si se agrega madera contrachapada a una de las caras del panel, se puede usar como un muro. Además, este elemento es muy

utilizado decorativamente debido a la posibilidad de alcanzar curvas y trabajar en voladizos (ThinkWood & WoodWorks, 2021).

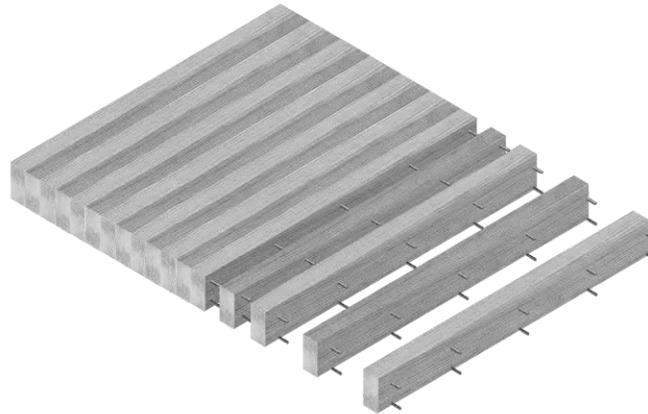


Ilustración 4. Nail-Laminated Timber (NLT). (ThinkWood & WoodWorks, 2021).

La tercera, **Dowel-Laminated Timber (DLT)**, se compone de tableros de madera que pueden ser de 5x10 [cm], 5x15 [cm], 5x20 [cm], entre otras dimensiones posibles. La unión de estos tableros (Ilustración. 5) viene dada por el ajuste a presión de los bloques (ThinkWood & WoodWorks, 2021).

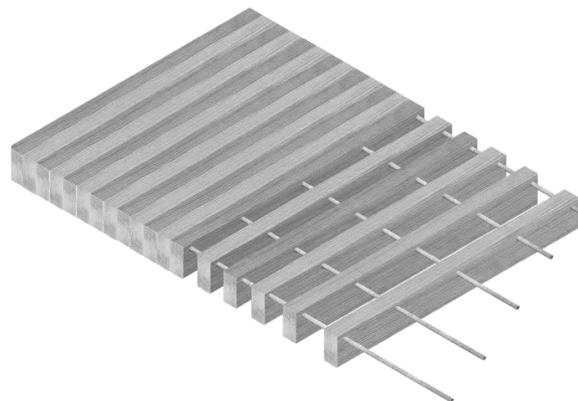


Ilustración 5. Dowel-Laminated Timber (DLT). (ThinkWood & WoodWorks, 2021).

La función del DLT es bastante similar a la del NLT, de tal manera que se utiliza en paredes, suelos, techos, escaleras, huecos de ascensores y también se puede montar para lograr acabados curvos. Un uso diferente al NLT es que al no tener conexiones metálicas entre sus capas (clavos), se pueden realizar cortes de tal manera que ofrezca la posibilidad de acomodar conexiones o ubicar aislantes (ThinkWood & WoodWorks, 2021).

La tercera categoría comprende un elemento que se puede utilizar para múltiples propósitos y forma parte del grupo MCE, que son elementos producidos por capas de chapas de madera seca y graduada, hebras o escamas unidas con adhesivo resistente a la humedad, formando así bloques de material llamados palanquillas, que luego se cortan a las dimensiones requeridas (APA, 2019b). **Laminated Veneer Lumber (LVL)** es el componente principal del grupo MCE. LVL se produce pegando chapas de madera seca con adhesivos resistentes a la humedad, el espesor de cada capa es de aproximadamente 2.5 [mm] a 3.2 [mm] y se colocan de manera paralela, finalmente después de un proceso de prensado en caliente, se obtiene un elemento con un espesor de 38 [mm] (Dieste et al., 2018). Dependiendo del grosor del elemento, se puede utilizar como panel o también como viga estructural. En este último caso, es habitual unir 4 elementos de espesor típico de LVL (Kam-Biron & Koch, 2014).

Cuando se trata de construcción en madera, es necesario tener en cuenta ciertas consideraciones, la primera de ellas sería la elección del **tipo de madera**. Para elaborar los productos que componen el MTC se utilizan principalmente árboles coníferos, entre estos se encuentran el abeto, el ciprés o el pino. Estas especies son ideales ya que reúnen las características necesarias como: (1) crecimiento rápido, (2) tronco recto y radio uniforme, (3) pocas ramas y (4) resistencia a plagas. En general, los árboles coníferos tienen un crecimiento más rápido en comparación con otros, por lo que estos árboles de madera blanda después de 20 años de crecimiento están disponibles para su uso (Coombs, 2015). Las maderas blandas son baratas, abundantes, disponibles en diferentes dimensiones y pueden manipularse fácilmente para crear productos de madera de ingeniería que optimicen sus propiedades estructurales, lo que la convierte en una gran opción que contribuye al uso de MTC como un producto eficiente y sostenible dentro de la construcción (Ramage et al., 2017).

La durabilidad natural de la madera está estrechamente relacionada con su especie y método de extracción. Hay algunas especies de madera que demuestran una alta durabilidad natural, pero debido a que no hay tantas, el uso de especies no protegidas se ha limitado al uso estructural. Sin embargo, la durabilidad y la vida útil son cosas que se pueden mejorar con diferentes métodos de tratamiento, como el tratamiento conservante, la modificación térmica y la modificación química (Ayanleye et al., 2022).

El **contenido de humedad (CH)** de los productos MT en el momento de la construcción y a lo largo de su vida útil depende de varias variables como la humedad acumulada, la exposición a la humedad, la humedad relativa y el secado al que se somete la madera. Al trabajar con madera se trabaja con un material que está expuesto al medio natural y, por lo tanto, es susceptible a la degradación por hongos, pero cuando está por debajo del 20% de contenido de humedad, esto ya no es un problema (Ramage et al., 2017).

La madera estructural tiene un proceso de secado en el que el contenido de humedad del elemento se reduce a aproximadamente el 12% para GLT o CLT y alrededor del 5% al 6% para LVL, este porcentaje es lo suficientemente bajo como para evitar la proliferación de hongos e insectos (Dieste et al., 2018). En el proceso de secado hay 2 métodos comúnmente utilizados que son el secado natural y el secado en horno. La primera consiste simplemente en dejar las tablas expuestas a secar en el ambiente, aunque es un proceso largo y difícil de controlar. El secado en horno, por otro lado, es mucho más rápido y a menudo se realiza quemando los desechos del proceso de producción (ramas/corteza) y la fabricación (desechos diversos del procesamiento de la madera). De esta manera, el proceso no demanda mucha energía de otras fuentes y puede considerarse un proceso neutro en carbono (Coombs, 2015).

El CH dependerá del diseño, construcción y mantenimiento de la estructura, lo mejor es cubrir los paneles estructurales de madera después de la instalación para evitar la exposición a la humedad. Una vez terminada la estructura, el CH suele estabilizarse en

valores que oscilan entre el 6% y el 14%, dentro de estos niveles no hay impactos negativos en la resistencia, rigidez o durabilidad. (APA, 2016b).

Otra cuestión que considerar son los **detalles de conexión** porque son muy importantes dentro del MTC para que la estructura funcione bien y sea útil para el usuario. Dado que MTC permite tramos más grandes, los detalles de conexión son esenciales, y se deben tener en cuenta los efectos de la contracción y expansión en la madera debido a la humedad. Las conexiones deben diseñarse de manera que las cargas de diseño se transmitan hacia y desde los miembros estructurales sin causar concentraciones de tensión que puedan causar fallas (APA, 2016a). Las conexiones mecánicas también deben diseñarse para proporcionar una disipación de energía adecuada en caso de deformación severa para que protejan a los otros elementos estructurales contra fallas frágiles (Geiser et al., 2021).

Los elementos MTC se unen mediante sujetadores tipo clavija que incluyen pernos, clavos, pasadores y tornillos. Los últimos son los más utilizados en conexiones, con una dimensión típica de 1/4 [in] y de tipo parcialmente roscado (WoodWorks, 2021). En combinación con sujetadores tipo pasador, los conectores de placa metálica se utilizan especialmente en juntas de viga a vigueta; las placas generalmente están hechas de acero galvanizado y deben tener la superficie y la forma necesarias para poder transmitir las fuerzas en la junta (USDA, 2021). Los detalles específicos sobre los diferentes tipos de conexiones se pueden encontrar en detalle en la “APA T300 Construction Guide” y en el “WoodWorks mass timber connections index”.

Uno de los temas más relevantes dentro del MTC es la **resistencia al fuego**. El uso de MT en estructuras más grandes dependerá en gran medida del diseño de ingeniería contra incendios de tal manera que garantice que la estructura sea capaz de mantener su integridad estructural, al tiempo que proporciona confianza y resistencia al usuario para que las personas puedan evacuar (Ramage et al., 2017).

Los elementos Glulam tienen un sistema en el que, en caso de incendio, toda la parte externa del elemento se carboniza, siendo así una capa que funciona como aislante para acabar con una especie de sección interna efectiva. La forma en que se diseña el elemento es utilizando la tasa de avance de carbonización que tiene un valor dado de 0,6 [mm] por minuto, siendo esta la base para la predicción de la resistencia al fuego (APA, 2022). Uno de los métodos mencionados por la asociación de madera de ingeniería (APA) permite calcular la resistencia al fuego de columnas y vigas realizadas por elementos Glulam, de tal manera que los siguientes valores de profundidad efectiva de carbonización (Ilustración. 6) se obtienen en función del tiempo previsto que la estructura estará en contacto con el fuego:

Required Fire Resistance (hr.)	Effective Char Layer Depth, α_{eff} (in.)
1-hour	1.8
1-1/2-hour	2.5
2-hour	3.2

Ilustración 6. Profundidad de carbonización efectiva. (APA, 2022).

Parte del proceso de construcción para evitar la propagación del fuego ocurre en áreas como paredes o techos donde se utiliza revestimiento de yeso que al ser un material

resistente al fuego evita la propagación del fuego (APA, 2019b), reduciendo la exposición de elementos estructurales y el colapso de paredes y techos. Aun así, hay que tener en cuenta que si los adhesivos que unen las capas de madera se descomponen a una temperatura inferior a la de carbonización, es posible que se produzca un proceso de caída de material de tal manera que evite la autoextinción (Xu et al., 2022).

MTC puede funcionar bien a altas temperaturas debido a su capa aislante y porque la conductividad térmica es menor que la del acero, por lo que el elemento no se calienta rápidamente. El mayor problema ocurre en las conexiones, ya que estas están necesariamente hechas de acero en la construcción de edificios, por lo tanto, son puntos donde el calor se puede conducir rápidamente (Ramage et al., 2017). En consecuencia, se sugiere que aquellas conexiones consideradas críticas para soportar las cargas que actúan sobre la estructura deben diseñarse para tener al menos la misma capacidad de resistencia al fuego que los elementos que soportan (Dagenais & Ranger, 2021).

OBJETIVO

¿Qué se sabe sobre los 5 componentes principales de la construcción de madera en masa, sus dimensiones recomendadas, usos y consideraciones sobre el tipo de madera, control de humedad, conexiones y resistencia al fuego?

METODOLOGIA

Para el siguiente artículo se realizó una revisión literaria sistemática (Snyder, 2019) para aprender sobre el uso estructural del MTC para edificios de apartamentos. Este documento lleva a cabo una investigación sobre el uso de la construcción masiva de madera (MTC) como material sustituto en la construcción de acero y hormigón. El artículo adopta un método de tal manera que puede ser replicado si se busca dentro de los recursos electrónicos mencionados que proporcionan artículos científicos válidos y minimizan el error de búsqueda. Después de una lectura detallada de diferentes documentos, la información se sintetizó y agrupó de tal manera que proporcionara un detalle específico de cada uno de los temas discutidos a partir de la información ya conocida. Una revisión de la literatura es un enfoque válido para esta investigación porque permite condensar la información de muchos artículos de tal manera que la información escrita es validada y complementada entre los diferentes autores que investigan el mass timber construction además de centrarse en sus componentes principales y detallar cuestiones que van de la mano con el material investigado.

Para la redacción del artículo se realizó una búsqueda considerando parámetros como clasificación, dimensiones, usos, así como cuestiones intrínsecas al material. La información recolectada fue evaluada y clasificada de acuerdo con su categoría y relevancia. Para la búsqueda se utilizaron varios recursos electrónicos, algunos generales y otros enfocados específicamente en el tema de la construcción en madera, estos recursos electrónicos son los siguientes: (1) APA, (2) ThinkWood, (3) FPInnovations, (4) ScienceDirect, (5) Colibri, (6) Structure Magazine, (7) ORCA y (8) USDA. Dentro de los diferentes motores de búsqueda, se utilizaron las siguientes palabras clave para encontrar la información buscada: "Mass timber", "CLT timber", "Glulam timber", "LVL timber", "NLT timber", "DLT timber", "Fire resistance timber", "Moisture control timber" y "Connection details timber".

Para definir los límites de la búsqueda, el primer paso fue investigar mucho sobre el tema, descartando información y códigos antiguos de los actuales de tal manera que haya un conocimiento básico de qué se trata, y qué elementos son los más importantes cuando se trata del MTC. Teniendo esto en cuenta, se seleccionaron artículos con no más de 5 años de antigüedad, solo un artículo de 2011 por su relevancia en el detalle de conexiones y otro de 2014. Todos los artículos, excepto uno, provienen del hemisferio norte del planeta debido a su avance e investigación sobre MTC. Dentro de la investigación, todos los documentos que trataban sobre el Lyfe Cycle Assessment (LCA) quedaron de lado ya que no es algo que entra en el alcance de la investigación y al momento de buscar las palabras clave es muy probable encontrarse con mucha investigación al respecto.

El objetivo principal de la investigación fue generar una base de información donde el lector pueda tener un conocimiento fácil y detallado de lo que conlleva, de tal manera que sea útil para futuras investigaciones o como guía sobre el material. Se realizó una revisión de 23 documentos, entre los que se encuentran artículos científicos, guías de construcción, revistas de construcción y tesis. Todos estos artículos fueron leídos cuidadosamente de tal manera que la información recopilada se puede organizar en función de las variables "Mass Timber Construction" y "Edificios altos"

La información recopilada se resume en tablas donde se encuentran su categoría, área, país, nombre del artículo, autor, año y recurso electrónico. Esto se hizo para mostrar la veracidad en la información recopilada y que cualquier lector puede encontrar esta información para una mayor investigación.

RESULTADOS

Los resultados del primer segmento detallan las fuentes a partir de las cuales se realizó la revisión literaria, de las cuales se contrastó y extrajo información relacionada con los elementos que componen la familia MTC. Como se puede ver en el Tabla. 1 de los 11 artículos analizados, 10 provienen del cono norte del planeta, siendo estos en su mayoría de Estados Unidos debido a los avances que han realizado en la investigación del uso de la madera en la construcción de edificios altos. Una de las principales fuentes es The Engineered Wood Association (APA), que es una asociación comercial sin fines de lucro que ha estado trabajando durante años en la creación de productos de madera con gran resistencia, versatilidad y confiabilidad para tener productos que sean funcionales en grandes estructuras. Asimismo, dentro de este primer apartado es importante señalar que ninguna cita tiene una antigüedad superior a 10 años, lo que verifica que los artículos de los que se extrajo la información representan investigaciones actualizadas.

Tabla 1. Resultados de la revisión bibliográfica de artículos relacionados con los componentes del MTC.

Categoría	Producto	Área	País	Artículos que contienen estas categorías	Autor	Año	Recurso electrónico
MAM: Estructural	Glue-Laminated Timber (Glulam)	América del Norte	EE. UU.	Glulam Product Guide	APA	2017	APA
		América del Norte	EE. UU.	Glulam selection and specification an excerpt of the engineered wood construction guide	APA	2019	APA
		Europa	Suecia	About Glulam	Swedish Wood	2022	-
MAM: Paredes, Suelo y Techo	Cross-Laminated Timber (CLT)	América del Norte	Canadá	Canadian CLT Handbook 2019 Edition	FP Innovations	2019	FP Innovations
		Europa	Alemania	Cross laminated timber (CLT): overview and development	Brandner et al.	2016	Google Académico
		América del Norte	EE. UU.	Cross-Laminated Timber selection and specification an excerpt of the engineered wood construction guide	APA	2019	APA
	Nail-Laminated Timber (NLT)	América del Norte	Canadá	Nail-laminated timber Canadian design & construction guide	Binational Softwood Lumber Council and Forestry Innovation Investment Ltd.	2017	ThinkWood
		América del Norte	EE. UU.	Mass Timber Design Manual	ThinkWood y WoodWorks	2021	ThinkWood
	Dowel-Laminated Timber (DLT)	América del Norte	EE. UU.	Mass Timber Design Manual	ThinkWood y WoodWorks	2022	ThinkWood
SCL: Multipropósito	Laminated Veneer Lumber (LVL)	América del Sur	Uruguay	Forest-based bioeconomy areas strategic products from a technological point of view	Dieste et al.	2018	Colibri
		América del Norte	EE. UU.	Engineered Wood Construction Guide	APA	2019	APA

		América del Norte	EE. UU.	The ABC's of Traditional and Engineered Wood Products	Kam-Biron y Koch	2014	Structure Magazine
--	--	-------------------	---------	---	------------------	------	--------------------

De la misma manera se encuentra la Tabla. 2, que detalla las fuentes de las que se extrajo información para llevar a cabo la revisión literaria sobre los temas esenciales de MTC. Para esta segunda sección, se analizaron 13 artículos/documentos, provenientes principalmente del hemisferio norte del planeta, siendo aproximadamente el 90% fuentes de América del Norte y Europa. Una de las principales fuentes dentro de esta sección es APA y la investigación llevada a cabo por Ramage y sus coautores ya que llevan a cabo una investigación en profundidad sobre todo lo relacionado con el uso de la madera en la construcción. Todos los artículos utilizados dentro de la revista literaria representan investigaciones actualizadas, por lo que ninguno tiene más de 10 años.

Tabla 2. Resultados de la revisión bibliográfica de temas esenciales sobre MTC.

Tema	Área	País	Artículos que contienen estos temas	Autor	Año	Recurso electrónico
Tipo de madera	Europa	Gales	The development of the building envelope using Welsh-grown timber: A study through prototyping	Coombs, Steven John	2015	ORCA
	Europa	Inglaterra	The wood from the trees: The use of timber in construction madera en la construcción	Ramage et al.	2017	ScienceDirect
	América del Norte	EE. UU.	Durability and protection of mass timber structures: A review	Ayanleye et al.	2022	ScienceDirect

Control de humedad	Europa	Inglaterra	The wood from the trees: The use of timber in construction	Ramage et al.	2017	ScienceDirect
	América del Sur	Uruguay	Forest-based bioeconomy areas strategic products from a technological point of view.	Dieste et al.	2018	Colibri
	Europa	Gales	The development of the building envelope using Welsh-grown timber: A study through prototyping	Coombs, Steven John	2015	ORCA
	América del Norte	EE. UU.	Wood moisture content and the importance of drying in wood building systems.	APA	2016	APA
Detalles de conexión	América del Norte	EE. UU.	Glulam connection details	APA	2016	APA
	Europa	Suiza/Italia	Influence of steel properties on the ductility of doweled timber connections	Geiser et al.	2021	ScienceDirect
	América del Norte	EE. UU.	WoodWorks index of mass timber connections	WoodWorks	2021	ThinkWood
	América del Norte	EE. UU.	Wood handbook—Wood as an engineering material	USDA	2021	USDA
Resistencia al fuego	Europa	Inglaterra	The wood from the trees: The use of timber in construction	Ramage et al.	2017	ScienceDirect
	América del Norte	EE. UU.	Calculating Fire Resistance of Glulam Beams and Columns	APA	2022	APA
	América del Norte	EE. UU.	Engineered Wood Construction Guide	APA	2019	APA
	Europa/Oceanía	Inglaterra/Australia	Large-scale compartment fires to develop a self-extinction design framework for mass timber—Part 1:	Xu et al.	2022	ScienceDirect

			Literature review and methodology			
	América del Norte	Canadá	Fire performance of mass timber	Dagenais y Ranger	2021	FPIInnovaciones

DISCUSIÓN

A partir de las fuentes analizadas, se puede determinar que la MT es un material factible para su uso dentro del sector de la construcción, ya que las mismas fuentes representan pautas o normas sobre el uso del material, y se ha podido llegar a este punto debido al gran proceso de investigación y pruebas de laboratorio que se han llevado a cabo sobre el material. Prueba de la viabilidad de esto son las estructuras existentes que han utilizado MT como sistema constructivo, el más importante a destacar es el edificio Ascent en Milwaukee, que actualmente es la estructura de mass timber más alta del mundo. Este es un edificio de apartamentos que tiene 25 pisos alcanzando una altura total de 86.6 [m] y con una superficie de 45,801 [m²], este edificio terminó su construcción en el año 2022. Tiene una base de 5 plantas de garajes de hormigón y el resto de las plantas residenciales está construida con MT utilizando elementos estructurales Glulam y mampostería con elementos CLT (Carlson, 2022). La construcción de proyectos con MT muestra que su uso es posible, actualmente en Estados Unidos ya hay un total de 738 proyectos que se están construyendo o ya se han construido y otros 833 que se están diseñando con este sistema (WoodWorks, 2022). Las fuentes bibliográficas y los edificios ya construidos nos permiten notar que

existe una preferencia por el uso de Glulam como elemento estructural, mientras que para pisos, paredes y techos hay una preferencia por el uso de CLT.

La bibliografía también indica que la energía consumida en una construcción con MT es casi un 20% menor que la energía consumida en una construcción con hormigón armado, de tal manera que el uso de madera estructural como sustituto de los materiales tradicionales sería una gran alternativa para promover la construcción sostenible y podría ayudar a mitigar el cambio climático (Duan et al., 2022). Otros estudios apuntan a un ahorro promedio del 40% en emisiones de gases de efecto invernadero entre el uso de CLT en lugar de materiales convencionales como el hormigón armado para edificios de varios pisos. Aun así, existe un alto rango de variabilidad en los resultados de la evaluación del life cycle assessment (LCA) que puede deberse a los edificios evaluados, las variaciones regionales, la forma de tratar el carbono biogénico y el material con el que se trabaja, por lo que aún es posible buscar estandarizar la forma de realizar el análisis de LCA para que no haya tanta incertidumbre en los resultados obtenidos (Younis & Dadoo, 2022).

La variable climática puede ser algo perjudicial para el uso de la madera ya que no existe información relevante sobre el comportamiento del MT en climas tropicales y subtropicales como la hay para climas templados como los de Norteamérica y Europa, por lo que podría haber efectos de diferencias ambientales en las características de los productos MT produciendo cambios en la vida útil de los elementos así como en el rendimiento del edificio, es por ello que se debe estudiar en profundidad cómo podría

afectar la ganancia de humedad, los cambios dimensionales y la integridad estructural. (Shirmohammadi et al., 2021).

La investigación existente hasta la fecha sobre la resistencia al fuego de estructuras construidas con MT ha dado lugar a los principios fundamentales para que el proceso de autoextinción ocurra en caso de incendio, sin embargo, diferentes investigaciones apuntan a la existencia de fenómenos complejos que son interdependientes y podrían influir en el proceso de autoextinción y, por lo tanto, afectar el comportamiento estructural de las estructuras construidas con MT (Xu et al., 2022).

Gran parte de la literatura citada en esta revisión literaria, como se ha mencionado, proviene del hemisferio norte del planeta, por lo que la información presentada en este trabajo y las consideraciones para la construcción con MT se basan puramente en la bibliografía consultada. Es posible que las variaciones de clima, el tipo de madera, los procesos de producción y los fenómenos naturales varíen las características mecánicas o físicas de los elementos, así como es necesario investigar otras consideraciones a tener en cuenta debido a la falta de investigación sobre este material en ciertas áreas del mundo y con ello la falta de regulaciones generales.

CONCLUSIONES

Este artículo resume la literatura existente sobre la construcción masiva de madera, centrándose en los principales elementos utilizados y las cuestiones relacionadas con el uso de este material en la construcción de edificios altos. Esta revisión literaria se llevó a cabo para servir como un primer acercamiento a lo que es la construcción de MT, detallando conceptos fundamentales y basándolo en artículos científicos, revistas de ingeniería y regulaciones de producción específicas existentes (estas pueden variar según el fabricante). Los artículos investigados señalan que la MT es un producto totalmente adecuado para la construcción de edificios altos con preferencia por el Glulam como elemento estructural utilizado tanto para vigas como para columnas y CLT como elemento ideal para su uso en paredes, pisos y techos, no solo eso, sino que también hay pruebas físicas de esta literatura con edificios y proyectos que se han llevado a cabo.

Sin embargo, esta revisión muestra que la mayor parte de la información proviene de América del Norte y Europa, por lo que se observa que se necesita más investigación en áreas como América del Sur para verificar si dentro de este continente se puede realizar la producción de estos elementos con la misma calidad y resistencia, así como si los árboles de este sector tienen propiedades similares a los árboles con los que trabajan en países donde se encuentran estos productos ya fabricados. La información recopilada se puede utilizar para futuras investigaciones donde se pueden realizar pruebas con árboles coníferos que existen dentro del continente sudamericano y se pueden realizar pruebas de elementos MT con materia prima de esta área.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abed, J., Rayburg, S., Rodwell, J., & Neave, M. (2022). A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures. *Sustainability*, 14(9), Article 9.

<https://doi.org/10.3390/su14095570>

APA. (2016a). *Glulam connection details*. APA.

APA. (2016b). *Wood moisture content and the importance of drying in wood building systems*. APA.

APA. (2017). *Glulam Product Guide*. APA.

APA. (2019a). *Cross-Laminated Timber Selection and Specification an Excerpt of the Engineered Wood Construction Guide*. APA.

APA. (2019b). *Engineered Wood Construction Guide*. APA.

APA. (2019c). *Glulam selection and specification an excerpt of the engineered wood construction guide*. APA.

APA. (2022). *Calculating Fire Resistance of Glulam Beams and Columns*. APA.

Ayanleye, S., Udele, K., Nasir, V., Zhang, X., & Militz, H. (2022). Durability and protection of mass timber structures: A review. *Journal of Building Engineering*, 46, 103731. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103731>

Binational Softwood Lumber Council and Forestry Innovation Investment Ltd. (2017).

Nail-laminated timber Canadian design & construction guide: Vol. 1.1.

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): Overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

British Columbia Forest Wood & Mass Timber Products. (n.d.). Naturally: Wood.

Retrieved October 31, 2022, from <https://www.naturallywood.com/products/>

Carlson, C. (2022, August 3). *Ascent skyscraper in Milwaukee becomes world's tallest timber building*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2022/08/03/ascent-tower-milwaukee-worlds-tallest-timber-building/>

Chai, S. Y. W., Ngu, L. H., How, B. S., Chin, M. Y., Abdouka, K., Adini, Mohd. J. B. A., & Kassim, A. M. (2022). Review of CO₂ capture in construction-related industry and their utilization. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 119, 103727.

<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103727>

Coombs, S. J. (2015). *The development of the building envelope using Welsh-grown timber: A study through prototyping*. Cardiff University.

Crawford, R. H., & Cadorel, X. (2017). A Framework for Assessing the Environmental Benefits of Mass Timber Construction. *Procedia Engineering*, 196, 838–846.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.015>

Dagenais, C., & Ranger, L. (2021). *Fire performance of mass timber*. FPIInnovations.

<https://library.fpinnovations.ca/en/viewer?file=%2fmedia%2fWP%2fInfoNote2021N19E.pdf#phrase=false&pagemode=bookmarks>

Dieste, A., Cabrera, M. N., Clavijo, L., Palombo, V., Moltini, G., Cassella, F., & Baño, V. (2018). *Forest-based bioeconomy areas strategic products from a technological point of view*. Udelar.FI. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/22789>

Duan, Z., Huang, Q., & Zhang, Q. (2022). Life cycle assessment of mass timber construction: A review. *Building and Environment*, 221, 109320.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109320>

Geiser, M., Bergmann, M., & Follesa, M. (2021). *Influence of steel properties on the ductility of doweled timber connections | Elsevier Enhanced Reader*.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121152>

Huang, L., Krigsvoll, G., Johansen, F., Liu, Y., & Zhang, X. (2018). Carbon emission of global construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1906–1916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>

Kam-Biron, M., & Koch, L. (2014). *STRUCTURE magazine | The ABC's of Traditional and Engineered Wood Products*. <https://www.structuremag.org/?p=7053>

Karacabeyli, E., & Gagnon, S. (2019). *CLT Handbook 2019 Full Edition: Vol. Volume 1* (2019 Edition). FPInnovations. <https://web.fpinnovations.ca/download/clt-handbook-2019-full-edition/>

Kim, T., Tae, S., & Roh, S. (2013). Assessment of the CO₂ emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 729–741.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.013>

Muhammad, S., Long, X., Salman, M., & Dauda, L. (2020). Effect of urbanization and international trade on CO₂ emissions across 65 belt and road initiative countries.

Energy, 196, 117102. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117102>

Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., & Abd. Majid, M. Z. (2015). A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

43, 843–862. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>

Ofori, G. (n.d.). *Nature of the Construction Industry, Its Needs and Its Development: A Review of Four Decades of Research*. 21.

Ramage, M. H., BurrIDGE, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. F., & Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, 333–359.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>

Shirmohammadi, M., Leggate, W., & Redman, A. (2021). Effects of moisture ingress and egress on the performance and service life of mass timber products in buildings: A review. *Construction and Building Materials*, 290, 123176.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123176>

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.

<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>

Swedish Wood. (2022). *About glulam*. Swedish Wood.

<https://www.swedishwood.com/building-with-wood/about-glulam/>

ThinkWood, & WoodWorks. (2021). *Mass Timber Design Manual* (Vol. 2).

UNDP. (2015). *Sustainable Development Goals | United Nations Development*

Programme. UNDP. <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>

USDA. (2021). *Wood handbook—Wood as an engineering material*. 546.

Vélez-Aspiazu, E. E., & Coello-Espinoza, L. E. (2017). Impactos ambientales producidos por la construcción de vivienda a gran escala en la ciudad de Guayaquil.

Dominio de las Ciencias, 3(3), 1066–1085.

WoodWorks. (2021). *WoodWorks index of mass timber connections*. WoodWorks.

WoodWorks. (2022). *Mass Timber Projects in Design and Constructed in the US*

(September 2022). <https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/WoodWorks-Mass-Timber-Projects-Sept-2022.png>

Xu, H., Pope, I., Gupta, V., Cadena, J., Carrascal, J., Lange, D., McLaggan, M. S., Mendez, J., Osorio, A., Solarte, A., Soriguer, D., Torero, J. L., Wiesner, F., Zaben, A., & Hidalgo, J. P. (2022). Large-scale compartment fires to develop a self-extinction design framework for mass timber—Part 1: Literature review and methodology. *Fire Safety Journal*, 128, 103523. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103523>

Younis, A., & Dadoo, A. (2022). *Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview | Elsevier Enhanced Reader.*

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104482>

Zhang, L., Wang, F., Song, H., Zhang, T., Wang, D., Xia, H., Zhai, S., Liu, Y., Wang, T., Wang, Y., & Min, R. (2022). Effects of projected climate change on winter wheat yield in Henan, China. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134734.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134734>