

DISEÑO ESTRUCTURAL EN MADERA Y SUS SISTEMAS EN ASCENSO





El aumento en la construcción con madera en el mundo en las últimas dos décadas ha estado marcado por un factor: la búsqueda por alcanzar cada vez mayores alturas. Esta carrera exige que ingenieros y constructores den un paso más allá para superar los límites del material, desencadenando innovaciones que están cambiando la forma de pensar y diseñar estas obras.

La construcción en madera ha variado en sus usos y aplicaciones en los últimos 100 años, manteniendo un grado de ocupación en viviendas unifamiliares y estructuras de baja altura en el país. En este sentido, el escenario climático actual y las necesidades que este conlleva han hecho que este material se vea

favorecido como opción constructiva, gracias a cualidades de sostenibilidad propias y únicas de este.

Esto porque uno de los mayores problemas al que nos enfrenta el siglo XXI apunta directamente al dilema de continuar produciendo

do bienes y servicios sin aumentar el daño medioambiental ya generado por la producción industrial, el que hoy tiene al planeta sumido en lo que el secretario general de Naciones Unidas, António Guterres, bautizó en 2023 como “la era de la ebullición global”.



El daño generado por los combustibles fósiles y la construcción en base a áridos es altamente significativo en materia de emisiones y energía consumida, donde a modo de ejemplo podemos señalar que el [35% de los residuos sólidos del mundo están vinculados a esta última industria](#). Debido a esto, se ha consolidado la necesidad de reorientar el sector al uso de materiales que generen me-

nos contaminación y consuman menos energía, siendo la madera el más apto para ello.

Esto, sin embargo, empuja al material a enfrentar un nuevo desafío; ya que, si bien se han desarrollado múltiples formas de utilizar la madera para edificar, los sistemas constructivos más comunes en Chile no han sido capaces de ascender más allá de los 7 pisos.

Con el exponencial aumento de personas viviendo o asentándose en las zonas urbanas, y el espacio acotado con el que estas cuentan, la opción más favorable para continuar desarrollando infraestructura habitacional es la construcción en altura, con el fin de responder tanto a las necesidades medioambientales como a las sociales.

La tecnología en madera y diseño estructural ha avanzado alrededor del mundo para que este material cuente con sistemas y metodologías que le permitan construir de manera vertical, cuidando su calidad de respuesta a cargas y otros fenómenos. Conoce los requerimientos clave para poder diseñar a nivel estructural en madera, y los sistemas que mejor encajan con este nuevo objetivo.

Necesidades y tipos de sistemas constructivos en madera

La primera pregunta al elegir construir con madera es cómo esta será utilizada para erigir la edificación en cuestión. La variedad es grande y los sistemas se diferencian por diversos elementos tales como características,

propiedades estructurales, desempeños y riesgos. La utilidad a darle al edificio será clave para esta elección; a lo que se suman tres palabras que imposibles de olvidar: resistencia, rigidez y ductilidad.

Al hablar de resistencia, tomaremos la definición entregada por Manuel Torres Buá a la Consellería de Cultura, Educación e Ordenación Universitaria de la Xunta de Galicia en 2014, donde refiere a esta como “la capacidad que tienen los elementos estructurales de aguantar los esfuerzos a los que están sometidos sin romper”.

En general, una gran resistencia implica que un material o sistema podrá manejar mayores fuerzas aplicadas sin superar el punto donde se rompa. En ese sentido, en la construcción con madera, esta cualidad apunta principalmente a cuanta fuerza puede soportar.

A partir de esto podemos pasar al siguiente concepto, que es la rigidez. Torres Buá la describe como “la capacidad de las estructuras de aguantar los esfuerzos sin perder su forma, manteniendo sus uniones”. Esta pérdida de forma, conocida como deformación, puede ser elástica o plástica, diferenciándose ambas entre si el material será o no será capaz de regresar a su estado origi-

nal una vez deje de aplicarse esta fuerza o esfuerzo, respectivamente.

La importancia de la rigidez en la construcción con madera radica en cómo estos sistemas se deforman ante la aplicación de cargas externas, generando mayores desplazamientos, en comparación a otras materialidades más rígidas como el hormigón o el acero.

Con esto en mente, surge la pregunta entonces por el tercer concepto que señalamos, la ductilidad. En el texto “La ductilidad en el

comportamiento sísmico de las estructuras”, de Carl Lüders, se define a esta como el parámetro con el cual se mide la capacidad de una estructura para deformarse más allá del límite elástico. Esta se determina a partir de la relación entre la deformación de rotura y el límite elástico del material, y en el caso de las edificaciones con madera, está directamente con los medios de unión y conexiones de sus elementos

De las tres capacidades antes mencionadas, son estas dos últimas las de mayor impor-



Resultados de ensayo de resistencia a carga lateral, con falla en medios de unión. Imagen: CIM UC

tancia estratégica a la hora de elegir un sistema constructivo. Dimensionar la capacidad de soportar cargas y desplazarse sin deformarse, y medir cuánta fuerza ha de aplicarse para alcanzar esta deformación irreversible, permite preguntarse qué nivel de exigencias estructurales requiere una obra, para configurar el proyecto con la mayor precisión para los usos que tendrá.

Dado que estos valores y propiedades varían significativamente en función de los diversos sistemas constructivos existentes en madera, la comprensión de estos parámetros permitirá seleccionar con precisión el más adecuado. Por ejemplo, el sistema Block, bastante expandido en el hemisferio norte, no es recomendable para construir en nuestro país debido a su menor resistencia estructural, causada por la decisión que este conlleva de utilizar la madera en dirección perpendicular a la fibra. Esto debilita su respuesta a cargas, y por ende, su desempeño.

Cuando bajamos esta situación a la realidad y necesidades nacionales, en tanto, hay un sistema constructivo que ha mostrado parámetros que se ajustan mucho mejor a estas. El entramado ligero, en sus dos variantes de marco-plataforma y *balloon frame*, están ampliamente expandidos en el país gracias a sus cualidades.



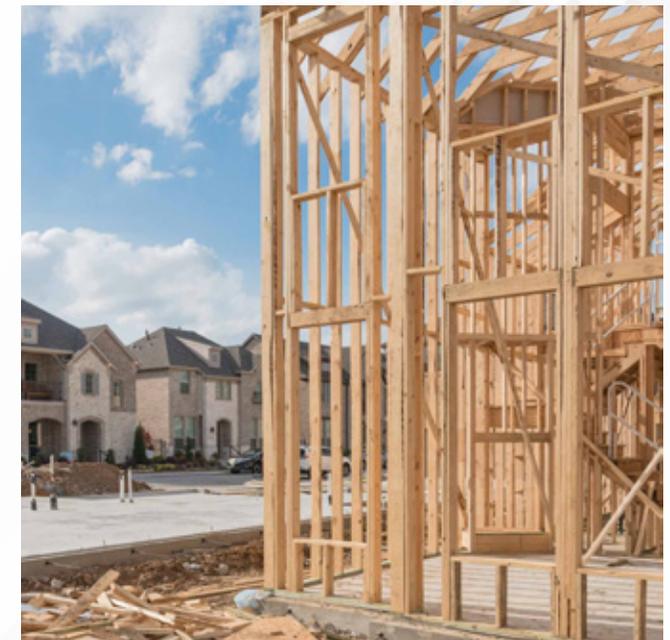
Sistema constructivo marco-plataforma
Fuente: [Madera21](#)

El primero destaca por resistir las solicitaciones de cizalle y poseer una rigidez suficiente para limitar las deformaciones hasta un valor permisible, según explica el [Manual de Diseño de Estructuras en Madera](#) de Centro UC de Innovación en madera. Este explica que, a partir de este, “se obtiene un sistema estructural completo que combina resistencia a cargas gravitacionales, arrostramiento lateral y transmisión de fuerzas horizontales hacia los niveles inferiores y fundaciones”.

La principal diferencia que caracteriza a este sistema de otras formas de entramado es la

extensión de sus muros, la que es interceptada por la ubicación de las losas, permitiendo un cociente de esbeltez (división entre alto del muro y base de la estructural) bajo y de mejor desempeño sísmico.

El *Balloon frame*, en tanto, destaca porque sus losas topan lateralmente con el muro, permitiendo que este se extienda desde el suelo hasta la cima del edificio. Esto le da ventajas a la hora del montaje en sitio, pero también aumenta su cociente de esbeltez, haciendo



Sistema constructivo *balloon frame*. Fuente: [Storables](#)

necesario aplicarlo en partes de edificio con un menor rol estructural.

La mayor piedra de tope de estos sistemas es que son eficientes hasta la mediana altura, dificultando la construcción por sobre los 6 pisos. Esta problemática, identificada en otros lugares del mundo, llevó en décadas pasadas a buscar nuevas formas de erigir, las que fueron ideadas en dos líneas particulares: innovar desde el material a utilizar, o desde la forma de ocupar las materialidades que ya tenemos a la mano.

Madera masiva como nuevo escalafón

Los sistemas de madera masiva, en inglés *mass timber*, son hoy conocidos por su extendida aplicación alrededor del mundo en edificaciones de gran altura en madera. Estos han sido esenciales para el ascenso en el número de pisos que han experimentado los edificios en madera alrededor del mundo, pudiendo ya alcanzar hasta los 25 pisos y 87 metros de altura en 2022 con el edificio Ascend, ubicado en Milwaukee, EE UU.

Si bien estos sistemas consideran una serie de materiales de ingeniería en madera



Sistema constructivo CLT. Fuente: [Madera21](#)

como el NLT (piezas de madera aserrada apiladas y unidas con clavos o tornillos para formar piezas estructurales) o el LVL (conocido en español como madera microlaminada), la materialidad más conocida, aplicada y estudiada a nivel global es el CLT, la madera contralaminada.

Este material, surgido en la década de los 90s en Europa Central, se caracteriza por ser un panel de alta resistencia y rigidez constituido por piezas de madera aserrada adheridas perpendicularmente la una de la otra. Esta laminación cruzada permite que la pieza de madera cuente con más de una dirección



Proyecto PYMELab, Chile
Imagen: [UBB](#)

para seguir los movimientos de fuerzas o cargas, otorgándole propiedades estructurales de gran utilidad para escenarios como el de nuestro país.

Este material, y la forma en que puede edificarse a partir de él, son de gran interés para nuestra industria nacional. Esto llevó a que, desde 2017, académicos de la Universidad del Bío Bío desarrollen I+D centrado en él, entregando valiosa información sobre este sistema constructivo, sus cualidades estructurales como su fabricación y factibilidad.

Así lo explicó el académico de la Universidad del Bío Bío e Investigador Asociado CENAMAD, Alexander Opazo, en el noveno webinar de la campaña Enlaces, con su presentación, titulada “Desafíos estructurales para edificios de madera contralaminada (CLT) en Chile”. A través de este trabajo, han podido identificar las fortalezas del material, y algunas debilidades que potenciar a futuro.

Al respecto, Opazo explicó que esto se debe a que, en diversos ensayos, los muros experimentales mostraban una resistencia positiva, pero también medidas de rigidez distintas a las necesarias. Es decir, los diafragmas

eran capaces de manejar deformaciones mayores a lo permitido por diversos marcos normativos de alrededor del mundo utilizados como referencia.

En base a esto, el académico explicó que, si se desea estructurar un proyecto totalmente en CLT (sistema conocido en inglés como *honeycomb*), los muros de corte tienen un rol protagónico en su correcto desempeño, ya que tanto panel como conectores deben ser elegidos y fabricados correctamente para entregar la rigidez, resistencia y ductilidad adecuada para manejar los distintos tipos de desplazamiento a los que el edificio se verá sujeto.

El trabajo de ensayo y prototipado de la Universidad del Bío Bío fue más allá, y en febrero de 2019 se anunció el proyecto del edificio PYMELab, una estructura en CLT de 5 pisos y 14.5 metros de altura, pensada para ser un laboratorio vivo del uso y aplicación de este producto en el país; monitoreando de manera constante y dinámica elementos como el desempeño sísmico, higrotérmico, acústico y de vibraciones de piso, entre otros.

Al respecto, Opazo destacó que, desde el inicio del monitoreo en agosto de 2023, el edificio ha sido objeto de múltiples fenómenos sísmicos, de más de 20 sismos que han superado los 4,5 grados en la escala de Richter, 5 de ellos por sobre los 5 grados. Al respecto, se ha observado que las propiedades dinámicas del edificio se han mantenido estables antes y después del temblor, tampoco viéndose afectadas por variables como los cambios de temperatura y humedad relativa, elementos de gran importancia en el uso de madera.

A pesar de esta buena respuesta y capacidad de potenciamiento de sus vulnerabilidades, el CLT cuenta con brechas técnicas y normativas que se interponen a su masificación y fuerzan a buscar otras soluciones. Ante esto, surge una segunda visión para diseñar y edificar: combinar materiales.

Construcción híbrida: la reinención de materiales conocidos

Podría decirse que el uso de madera u hormigón en construcción estructural no son exactamente algo innovador. Sin embargo, es el

uso de ambos de manera combinada lo que hace novedosa esta metodología constructiva. Las brechas que impiden la masificación de sistemas netamente en madera disminuyen considerablemente en el caso de la construcción híbrida, al abrir paso parcialmente a materiales ya conocidos por la sociedad.

La hibridación presenta la premisa de aprovechar lo mejor de cada material, potenciando sus fortalezas y compensando sus vulnerabilidades. Así, el hormigón se aventaja del menor peso sísmico y mejor aislación térmica que ofrece la madera, además de una cuantificable disminución en el carbono embebido de la estructura y mejoras en su productividad.

Simultáneamente, la madera se beneficia también del uso complementario de hormigón por la resistencia y rigidez que este adiciona a sus construcciones. A esta se suma la masa térmica que agrega a la edificación, haciendo que tarde más tiempo en cambiar de temperatura, mayor aislación acústica, y resistencia contra agentes xilófagos, entre otros.

Si bien la combinación de materialidades es aplicable a muchas tipologías constructivas, su principal uso en la madera hoy apunta a la adición de hormigón. Esta puede realizarse a través del uso de podios o núcleos, siendo



Edificio híbrido Brock Commons, Vancouver.
Imagen: [University of British Columbia](https://www.ubc.ca)

esta la combinación de ambos la opción más común. La unión de estos elementos, más una gran envolvente de madera en sistemas como el poste y viga, resultan particularmente reconocidos, dado que es un sistema muy efectivo en temas de costos.

La combinación de podio y núcleo de hormigón junto a madera suele desenvolverse mejor en el contexto de cargas laterales, logrando que los edificios cuenten con una planta ini-

cial más rígida, y que las cajas de escaleras y ascensores cuenten con gran estabilidad dimensional, además de altas capacidades de rigidez y resistencia gracias al hormigón.

En palabras de Pablo Guindos, investigador de CENAMAD, esto ocurre gracias a la estabilidad gravitacional que el núcleo de hormigón confiere a la estructura, tomando esta carga y bajándola al podio a través del vínculo directo que genera con este.

De esta manera, los edificios en madera crecen en altura, confrontando y superando diversos desafíos. Actualmente, las estructuras más grandes en este material en el país se mantienen en la mediana altura, pero el cierre de esta brecha se ve más próximo de lo imaginable. Prontamente la tecnología desarrollada para el diseño estructural en madera estará presente en edificaciones icónicas en el país, dando pie a lo que podría ser el próximo ciclo de la construcción.



Conoce más de Enlaces en:

