

CLT: MÉTODOS DE DISEÑO Y ASPECTOS REGLAMENTARIOS

Roberto Afie
MSc. Arquitecto

Resumen

Pocas tecnologías se han difundido tan veloz y extensamente como la de los paneles conocidos como *Cross-Laminated Timber* (CLT), o paneles de madera contralaminada. Su uso en la construcción residencial surge en Europa Central a partir de los años 1990, y se ha incrementado exponencialmente en las décadas siguientes, convirtiéndose en el producto estrella entre las nuevas tecnologías constructivas.

Se trata de sistemas estructurales compuestos por paneles fabricados a partir de listones de madera de poco espesor unidos lateralmente formando láminas, que luego se superponen ortogonalmente en un número impar de capas, en general de 3 a 7. Estas capas o láminas son encoladas y comprimidas para formar un panel sólido, obteniéndose un producto de alta resistencia y rigidez, tanto para esfuerzos en su plano como perpendiculares al mismo.

Este trabajo describe los estándares y métodos de diseño utilizados en la actualidad para el dimensionamiento y verificación de elementos estructurales de CLT, así como su aplicación en las normativas para madera a nivel internacional.

Abstract

Few technologies have spread as rapidly and extensively as Cross-Laminated Timber (CLT) panels. Their use in residential construction began in Central Europe in the 1990s and has exponentially increased in the following decades, becoming the flagship product among new construction technologies.

These are structural systems composed of panels made from lumber boards joined laterally to form sheets, which are then overlaid orthogonally in an odd number of layers, generally from 3 to 7. These layers are glued and compressed to form a solid panel, resulting in a product of high strength and stiffness, both for stresses within its plane and perpendicular to it.

This article describes the current standards and methodologies in use for the design and verification of CLT structural elements, as well as their application in different wood structures norms.

Antecedentes y primeros desarrollos

La utilización de la madera en la construcción se remonta a los orígenes de las primeras civilizaciones agrícolas. A lo largo de la historia se la ha elegido como material de construcción dada su amplia disponibilidad y abundancia, su versatilidad y resistencia en relación a su peso. Sin embargo, a pesar de sus muchas ventajas, su utilización presenta una variedad de desafíos. Las propiedades de la madera no resultan homogéneas, variando significativamente dependiendo de la especie, contenido de humedad, procedencia de los árboles y posición de las piezas obtenidas de un mismo tronco. Estos condicionantes, sumados a la percepción de durabilidad limitada y a su combustibilidad, fueron relegando a la madera en favor de otros materiales sobre todo en la Europa mediterránea. En tanto su uso se mantuvo inalterado en los países escandinavos y luego en Norteamérica.

El interés en la madera resurge a mediados de los años 60 con la aparición de nuevos productos llamados *engineered wood product* (EWP), o elementos elaborados a partir de madera. Productos como el *glued laminated timber* (GLT) o madera laminada encolada, van a permitir la construcción de elementos de mayor complejidad y robustez. Surgen también los primeros paneles, como el *plywood* o tableros laminados, y los *oriented strand boards* (OSB), utilizados principalmente como elementos secundarios para recubrimiento y protección de las estructuras principales [1]. Otros productos de esta categoría son el *medium density fiberboard* (MDF), el *laminated veneer lumber* (LVL), y el *laminated strand lumber* (LSL).

A mediados de los años 90 surge en Europa central un nuevo producto, el *cross laminated timber* (CLT) o madera contralaminada. Los primeros desarrollos parten de la industria maderera en Austria y Alemania, con la finalidad de otorgar valor agregado para las tablas laterales resultantes del aserrado de los troncos, consideradas en parte desperdicio.

Durante la primera década del siglo XXI se amplía la capacidad de producción de paneles, en principio con epicentro en Europa central y gradualmente expandiéndose a otras regiones. Desde entonces la producción anual global de paneles ha crecido en forma exponencial, desde 50.000 m³ a comienzo del siglo hasta superar los 2.000.000 m³ en 2020.

Evolución reglamentaria

Las propiedades de estos paneles fueron originalmente definidas en Europa a partir de 1998 por regulaciones nacionales, posteriormente desde el año 2006 por el trabajo de comités técnicos internacionales (*International European Technical Approval* - ETA). Las primeras actividades tendientes a la estandarización comienzan en el año 2008, y el primer estándar europeo para CLT, la norma EN 16351, es aprobada en 2015. Esta regula los procesos de producción y construcción, pero no de diseño. Estos últimos se pueden encontrar en algunos anexos nacionales al estándar europeo Eurocódigo 5, como por ejemplo el Anexo Nacional Austriaco K en la norma ÖNORM B 1995-1-1: 2015.

El Reglamento europeo para diseño de estructuras de madera, Eurocódigo 5, fue publicado en 2004 luego de un desarrollo que comienza en 1983 con la publicación del "*Structural Timber Design Code*" por parte del CIB (*International Council for*

Research and Innovation in Building and Construction). Dado lo reciente del desarrollo de la tecnología de estructuras de paneles contralaminados, el Eurocódigo 5 no incluye criterios de diseño para CLT. En la actualidad distintos grupos y equipos de proyecto bajo la órbita del comité técnico CEN TC 250/SC 5 se encuentran desarrollando la llamada “segunda generación” del Eurocódigo 5. Este incorporará los nuevos productos y diseños que la práctica ha ido desarrollando, entre los que se incluye el diseño utilizando paneles CLT [2].

En Norteamérica FPIInnovations -ONG canadiense dedicada a investigación y desarrollo en el sector forestal- publica la primera versión del “*CLT Handbook*” en 2011, en su edición canadiense. La amplia aceptación de este trabajo impulsó la edición de una versión estadounidense del mismo en el año 2013 [3]. Este manual, actualizado en su versión 2019, constituye uno de los más completos trabajos en relación a esta tecnología, abarcando métodos de producción, diseño estructural, verificación de conexiones, y aspectos ambientales y logísticos. Ambas ediciones han servido como referencia a las autoridades regulatorias norteamericanas en las propuestas de modificaciones a los códigos a fin de introducir y adoptar estas tecnologías. Como consecuencia de esto posteriormente se las incluye en la norma canadiense CSA 086, “*Canadian Standard for Engineering Design in Wood*” y la estadounidense ANSI/AWC “*National Design Specification for Wood Construction*”.

Con base en los estándares publicados en el *CLT Handbook* de 2011 se desarrolló la norma norteamericana armonizada (Estados Unidos - Canadá) ANSI/APA PRG-320 (2019), que define tanto los grados aprobados de paneles de CLT y sus propiedades de diseño como las capacidades admisibles a flexión para los distintos grados. Dado que el marco reglamentario general para madera en Estados Unidos utiliza el método de tensiones admisibles, y en Canadá el de estados límites, esta norma contiene tablas de diseño para ambos métodos.

En tanto en nuestro país en el año 2016 se publica el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601-2016, fruto de la cooperación entre INTI-CIRSOC y el Grupo de Estudio de Maderas de la UTN-FRCU. Dicho reglamento toma como base la norma “*National Design Specification for Wood Construction*”, edición 2005.

Junto con este Reglamento se publicó el Manual de Aplicación de los Criterios de Diseño adoptados en dicha norma, y posteriormente la Guía para el Proyecto de Estructuras de Madera con Bajo Compromiso Estructural (2018). Si bien el Reglamento CIRSOC 601-2016 desarrolla en su capítulo 5 el diseño de miembros estructurales de madera laminada encolada estructural, aún no se incluye la madera contralaminada.

Normativa europea

La norma EN 16351 constituye el estándar europeo que define las características de los paneles CLT y aplica a la madera contralaminada:

- destinada a su utilización en las clases de servicio 1 o 2 conforme a la Norma EN 1995-1-1.
- elaborada con especies de maderas coníferas o álamo.

- constituida como mínimo por tres capas encoladas perpendicularmente (siendo al menos dos de ellas capas de madera).
- que puede incluir en función del número de capas, capas contiguas que pueden encolarse en dirección paralela a la fibra.
- que incluye capas de madera constituidas por madera clasificada para uso estructural conforme la Norma EN 14081-1.
- que incluye capas de madera de grosores comprendidos entre 6mm y 60mm (ambos incluidos) teniendo en cuenta los requisitos de distribución especificado en esta norma europea.
- constituida por capas de elementos de madera que pueden estar encolados o no por sus cantos y con una separación entre láminas contiguas menor a 6 mm.
- que puede incluir capas de tableros derivados de la madera de utilización estructural tales como los especificados en esta norma europea, conformes con los requisitos correspondientes a la utilización de las clases de servicio 2 o 3 conforme a la Norma EN 1995-1-1, y que no incluyan ensambles estructurales entre los tableros individuales, y con grosores comprendidos entre 6mm y 45mm (ambos incluidos).
- encolada con adhesivos conformes con los requisitos especificados en esta norma europea;
- con grosores totales menores o iguales a 500mm.
- que no está constituida con madera reutilizada o con tableros de la madera que contengan madera reutilizada.

Adicionalmente,

- que pueden incluir uniones macrodentadas.
- que pueden ser curvas.
- que pueden ser tratadas con preservantes contra ataques biológicos.
- no se incluye a la madera contralaminada tratada con productos ignifugantes.

La madera utilizada en la fabricación de paneles se clasifica de acuerdo a propiedades de resistencia, rigidez y densidad similares en “Clases Resistentes”, de acuerdo a la norma EN 338. La misma establece un sistema internacional de clases resistentes que permite insertar en él grados de calidad para distintas especies y procedencias, en tanto sean clasificados de acuerdo a los requisitos establecidos en la norma EN 14081-1 para clasificación visual y 14081-2/3 para clasificación por medios mecánicos. Los valores característicos empleados en el sistema de clases resistentes se determinan siguiendo la metodología establecida en la norma EN 384, y las propiedades físicas y mecánicas según la norma EN 408 [4]. Para asignar una madera a una determinada clase resistente ésta debe cumplir con los valores mínimos de la categoría en las propiedades de resistencia, rigidez y densidad. A las coníferas se las designa con la letra C seguida del valor de la resistencia característica a flexión, expresada en N/mm². A las frondosas en forma similar, pero con la letra D.

Los paneles de madera contralaminada en el mercado europeo se fabrican en su mayor parte a partir de madera aserrada de clase resistente C24, con porcentajes menores al 10 % de clase resistente C16 [5].

La norma EN 16351, “Estructuras de madera. Madera contralaminada. Requisitos”, se relaciona con las dos normas previas sobre productos laminados encolados y/o

empalmados: EN 14080 “Estructuras de madera. Madera laminada y madera maciza encolada. Requisitos”, y EN 15497 “Madera maciza estructural con empalmes por unión dentada. Requisitos de prestación y requisitos mínimos de fabricación”.

En su introducción la norma pone en contexto a la madera contralaminada relacionando todos los productos laminados y encolados a partir del tablón, indicando las normas que regulan cada producto (Figura 1).

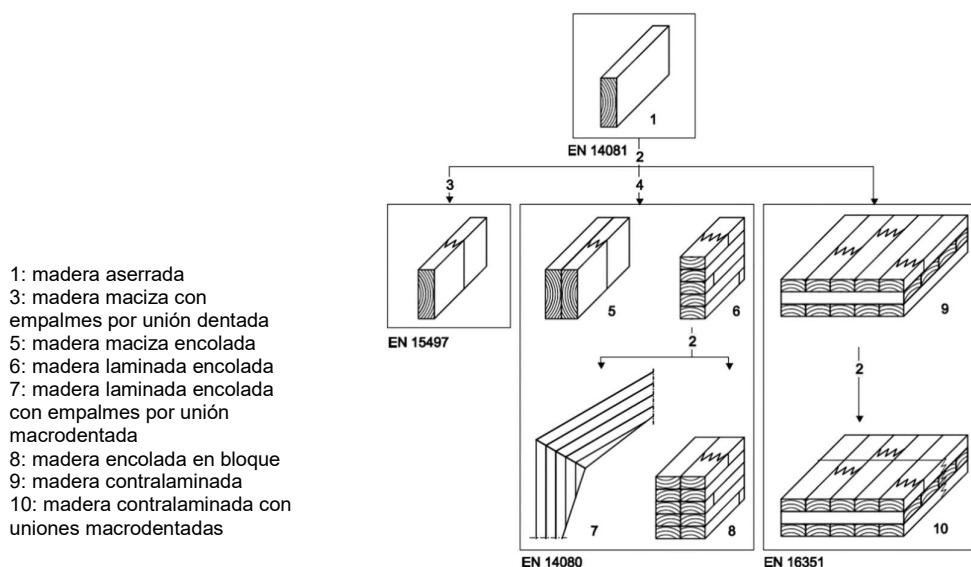


Figura 1: Productos de madera estructural y sus correspondientes normas europeas, según EN 16351

Luego de definir su alcance, las normas relacionadas, y los términos y definiciones, la norma establece las características requeridas a lo largo de los siguientes tres capítulos y 10 anexos, de la siguiente forma según reseñados por G. Medina [6]:

Características, ensayos y métodos de evaluación de los componentes y productos:

- Características de los componentes: establece los requisitos para: (1) la madera utilizada en las láminas; (2) las láminas empalmadas por unión dentada; (3) las capas de madera y (4) capas de tablero derivados de madera; (5) especies de madera, donde enumera más de 20 especies de coníferas como aptas para CLT y; (6) adhesivos, según sean para uniones dentadas, encolados de cantos entre láminas (si los hay), entre capas, y en uniones macrodentadas, y según se trate de adhesivos de tipo fenólico y aminoplástico (MF, MUF, PRF, UF), poliuretano monocomponente de curado en húmedo (PUR), o basados en isocianato y polímeros de emulsión (EPI).
- Características de la madera contralaminada: define (1) criterios generales; (2) límites, tolerancias geométricas, constitución y distribución de capas del panel; (3) propiedades de resistencia y rigidez de la madera contralaminada, permitiendo obtenerlas mediante datos de la geometría y propiedades de las

capas o mediante ensayos del panel; (4) resistencia y rigidez de paneles con uniones macrodentadas; (5) resistencia del encolado para uniones dentadas entre láminas, encolado entre capas, encolado de canto entre láminas (si los hubiera) y uniones macrodentadas (si las hubiera); (6) resistencia al fuego; (7) reacción al fuego; (8) estabilidad dimensional, aportando una fórmula para corregir medidas para contenidos de humedad diferentes al 12%; (9) emisión de sustancias peligrosas, estableciendo que la única sustancia peligrosa de declaración obligatoria es el formaldehído y; (9) durabilidad, contemplando la del encolado y la biológica.

Evaluación y verificación de la constancia de las prestaciones:

Este capítulo se está incorporando en todas las revisiones de las normas armonizadas europeas de productos de construcción. Establece la forma de demostrar conformidad del producto con los requisitos de la norma y con lo indicado en la Declaración de Prestaciones del fabricante. Se debe demostrar mediante ensayo del “producto tipo” e implementación de un Control de la Producción en Fábrica (CPF) por el fabricante. Se especifica el número de muestras que se deben ensayar en la determinación del producto tipo, las características que deben comprobarse, la norma de ensayo y la norma que establece los criterios de conformidad aplicables a los resultados de los distintos ensayos o comprobaciones [6].

Marcado y etiquetado:

En este capítulo se establece que cada panel CLT que cumpla con este estándar europeo debe llevar un marcado durable en su superficie, o una etiqueta durable adherida al mismo. Se debe incluir la siguiente información: nombre y dirección del cliente, número de orden de compra, y dimensiones y cantidades del envío de paneles CLT. Este marcado no debe confundirse con los requisitos de marcado obligatorio CE, que se describen en el Anexo ZA.

Anexos:

- Anexo A: Liberación de formaldehído
- Anexo B: Métodos de ensayos complementarios para adhesivos.
- Anexo C: Ensayo de delaminación de planos de encolado.
- Anexo D: Ensayos de esfuerzo cortante.
- Anexo E: Ensayos de láminas con o sin empalmes por unión dentada.
- Anexo F: Determinación de las propiedades de resistencia, rigidez y densidad de la madera contralaminada.
- Anexo G: Medición del contenido de humedad.
- Anexo H: Ensayos de separación con empalmes por unión dentada en láminas fabricadas mediante aplicación sin contacto de adhesivo.
- Anexo I: Requisitos mínimos de fabricación.
- Anexo ZA. En todas las normas armonizadas europeas este último anexo refiere a las disposiciones del Reglamento Europeo de Productos de la Construcción, en este caso su aplicación al producto específico de la madera contralaminada.

Es importante destacar que, a pesar de su extensión, la norma EN 16351 solo regula requisitos de producción y características de la madera contralaminada, pero no criterios ni metodologías de diseño. La versión actual del Eurocódigo 5 tampoco

incluye el diseño de madera contralaminada, que será incorporado en la actualización que se encuentra en proceso. Por lo tanto, los procedimientos de diseño utilizados son aquellos incluidos en los Anexos Nacionales al estándar europeo, tales como el alemán (DIN EN 1995-1-1) y el austríaco (ONORM B 1995-1-1). También son de uso varias regulaciones técnicas y especificaciones emitidas por los fabricantes, así como los libros y manuales basados en los resultados presentados por la gran cantidad de proyectos de investigación llevados a cabo hasta la fecha [1]. Entre los trabajos de elaboración de guías de diseño cabe destacar los desarrollados por G. Schickhofer en el Instituto de Ingeniería y Tecnología de la Madera, Universidad Tecnológica de Graz, y por Wallner-Novak para proHolz Austria.

Normativa norteamericana

La norma armonizada binacional ANSI/APA PRG-320 (2019) establece los estándares de producción para paneles de madera contralaminada, define grados de acuerdo a las especies que los componen y establece sus propiedades mecánicas. Su primera versión data de 2011 y está desarrollada en base a múltiples aportes, pero en especial al trabajo previo de FPInnovations, organización canadiense que publicó en 2011 la primera versión del “*CLT Handbook*”. Esta norma, al igual que todos los estándares ANSI, constituye un estándar voluntario. Si bien no obliga a los fabricantes, provee una certificación del producto que determina los estándares de la industria.

Los paneles de madera contralaminada referenciados en esta norma se definen como un producto prefabricado de madera laminada, compuesto de al menos tres capas ortogonales de madera aserrada clasificada o tableros estructurales derivados de madera (SCL), que son laminados mediante la utilización de adhesivos estructurales. Establece el contenido promedio de equilibrio de humedad en condiciones de servicio en no más del 16% (para Estados Unidos).

Luego de definir su alcance, normas relacionadas, terminología y símbolos, la norma establece las características requeridas a lo largo de los siguientes cuatro capítulos, dos anexos y cuatro apéndices, de la siguiente forma:

Dimensiones y tolerancias de los paneles:

Establece los requisitos para: (1) espesor de los paneles, que no excederán los 508mm; (2) tolerancias dimensionales para el espesor, el ancho y el largo de los paneles; (3) escuadría y; (4) alineación.

Requisitos de los componentes:

- Capas de madera: establece los requisitos para: (1) tipos de láminas utilizadas en cada capa; (2) especies permitidas, donde autoriza cualquier especie de madera conífera, o combinación de especies, reconocidas por la norma PS 20 estadounidense o la CSA 0141 canadiense, que tengan un valor de densidad mínimo publicado de 0,35 g/cm³; (3) permite la utilización de tableros laminados estructurales en sus distintas variedades (LSL-LVL-OSL-PSL), que cumplan los requisitos de la norma ASTM D5446, y con una densidad mínima publicada de 0,35 g/cm³; (4) relación mínima entre ancho y espesor de las tablas de capas

longitudinales y transversales, y espesor mínimo (16mm) y máximo (51mm) de las tablas de cualquier capa; (5) contenido máximo de humedad ($12 \pm 3\%$) de las tablas al momento de fabricación; (6) preparación de las caras para recibir el adhesivo; (7) tolerancias dimensionales en las caras en las que se aplica el adhesivo; (8) separación máxima entre cantos de tablas adyacentes en una capa.

- Adhesivos: define las exigencias para los adhesivos a utilizarse en la fabricación de los paneles: (1) en Estados Unidos deben cumplir la norma ANSI 405 con excepción de su apartado 2.1.6, y con determinadas condiciones para los artículos de dicha norma referidos a ensayos de llama a pequeña escala; (2) en Canadá deben cumplir la norma CSA 0112.10 y los artículos 2.1.7 y 3.7 de la ANSI 405, con las condiciones para ensayos de llama a pequeña escala similares a los definidos en (1); (3) refiere al Anexo B en lo relacionado a requisitos de desempeño a temperaturas elevadas.
- Uniones entre tablas: (1) establece que todos los empalmes entre tablas cumplan los requisitos establecidos en dicha sección; (2) permite y determina los requisitos y ensayos para uniones entre extremos de tablas de los tipos unión dentada y unión biselada, no autorizando uniones a tope; (3) define los requisitos y ensayos para uniones entre cantos y caras de tablas, tanto para ensayo de corte en bloque como para ensayo de delaminación.

Criterios de desempeño de los paneles contralaminados:

- Grados y configuración de los paneles: refiere al Anexo A en lo referente a grados y configuraciones básicas de paneles, que serán especificados en la norma de fabricación de cada planta certificada por una agencia acreditada. Establece que aquellos grados y configuraciones no listados en dicho anexo serán considerados como casos particulares, y serán permitidos cuando hayan sido aprobados por una agencia acreditada siguiendo los lineamientos de esta norma en su capítulo 8.
- Requisitos de rendimiento estructural: determina que los valores de diseño para cada grado y configuración de paneles se definirán utilizando un modelo de cálculo reconocido por una agencia acreditada, y refiere al capítulo 8 en lo relacionado a evaluación y ensayos.
- Clasificación de apariencia: establece que la apariencia del panel será aquella convenida entre el usuario final y el fabricante, y refiere al apéndice X1 para ejemplos de referencia.

Aptitud y marcado del producto:

- Requisitos de aptitud: remite al capítulo 6 de esta norma en lo referente a ensayos de aptitud que deben cumplir los distintos componentes de la madera contralaminada, y provee una tabla que los compendia.
- Precalificación de la fábrica: la determina en función de los requisitos que deben cumplir los paneles de muestra a ser evaluados. Establece las condiciones de fabricación de los mismos, su acondicionamiento y cantidad de muestras a ser ensayadas de cada panel. Define las metodologías para los ensayos de corte y de delaminación cíclica.
- Requisitos de área efectiva de adherencia: establece que el fabricante establecerá reglas de verificación visual para las caras de adherencia entre

capas de modo de garantizar una superficie promedio de adherencia no menor al 80%.

- Requisitos de desempeño estructural: como parte del proceso de certificación de la planta productora establece los ensayos obligatorios y opcionales de resistencia de las muestras de paneles, de modo de confirmar los valores definidos en la norma.
- Certificación de las propiedades mecánicas: establece que los valores de propiedades mecánicas requeridos en esta norma serán aprobados por una agencia acreditada, definiendo criterios para cantidad y contenido de humedad de las muestras, métodos de ensayo para resistencia a flexión en el plano, corte en el plano, flexión de canto, y resistencia a corte de canto.
- Recalificación por cambios en los procesos: establece qué cambios significativos en los procesos de fabricación o en las instalaciones estarán sujetos a procedimientos de recalificación.
- Especificaciones de la planta: indica que una vez cumplidos los requisitos anteriores se emitirá un documento único para el producto y la fábrica, a ser utilizado con la finalidad de control de calidad.
- Certificación y marcado: establece los requisitos de marcado de cada producto. Define la información a incluir en el estampado o certificado de conformidad.

Control de calidad:

Este capítulo define los procesos y ensayos destinados a asegurar la calidad de los paneles de madera contralaminada producidos bajo esta norma.

Anexo A: Propiedades de diseño

Describe la composición de los grados y composición de los paneles CLT estándar definidos por esta norma, y estipula en su Tabla 2 los valores de diseño de cada configuración en base a los valores de diseño de las combinaciones de maderas provistas en su Tabla 1.

Se definen 14 composiciones básicas, donde se identifica con la letra E a aquellas basadas en maderas clasificadas por medios mecánicos, con V a aquellas basadas en maderas con clasificación visual, y con S a las producidas con tableros laminados.

Por tratarse de una norma binacional con normas locales para madera basadas respectivamente en método de tensiones admisibles (Estados Unidos) y de estados últimos (Canadá), se incluyen tablas para ambos casos. Adicionalmente, las tablas para uso en Estados Unidos listan sus valores con unidades en Sistema Imperial (*US customary system*) y las de uso en Canadá en Sistema Internacional.

Se completa con los siguientes anexos:

Anexo B: Evaluación del comportamiento de los adhesivos a alta temperatura mediante el Ensayo de Fuego en Cámara

Anexo X1: Ejemplos de clasificación de CLT por apariencia

Anexo X2: Configuración del ensayo utilizado en el desarrollo del Anexo B

Anexo X3: Modelos matemáticos utilizados en el desarrollo de los valores de diseño incluidos en el Anexo A

Anexo X4: Historia de esta norma

Normativa en Argentina

El primer Reglamento para Diseño de Estructuras de Madera se edita en 2013 (CIRSOC 601), siendo finalmente aprobada oficialmente su versión 2016. Este reglamento toma como base a la norma estadounidense “*National Design Specification for Wood Construction*” (NDS), en su versión 2005. Por lo tanto, se trata de un reglamento desarrollado según el método de tensiones admisibles.

Si bien el reglamento tomado como referencia (NDS) en su versión 2018 ya incluye un nuevo capítulo referido a madera contralaminada (*Chapter 10: Cross-laminated timber*), esta tecnología aún no ha sido incluida en el reglamento argentino. Es de destacar que el capítulo mencionado de la norma NDS-2018 remite a los estándares y criterios fijados por la Norma ANSI/APA PRG-320.

Los estándares para clasificación visual, clases de resistencia y requisitos de fabricación y control están determinados en las Normas IRAM.

Las normas referidas a clasificación por resistencia están basadas en el sistema europeo de clases resistentes, que requiere tres determinaciones básicas para la inclusión de una especie en el sistema: el módulo de rotura (MOR) característico, el módulo de elasticidad en flexión (MOE) medio, y la densidad característica. Así la norma IRAM 9664 está basada en la norma europea EN 384, y la IRAM 9663 en la EN 408. En cuanto a madera laminada estructural, el desarrollo de las normas IRAM correspondientes se inicia en el año 2006 y también está basado en las normativas europeas. Estas últimas se agrupan a partir del año 2013 en la EN 14080, “Estructuras de madera, madera laminada y madera maciza encolada. Requisitos”, de la que resulta complementaria la EN 15497 “Madera maciza estructural con empalmes por unión dentada. Requisitos de prestación y requisitos mínimos de fabricación”.

Métodos de diseño

Los procedimientos de diseño deben tener como sustento una adecuada y confiable definición de las propiedades mecánicas del material. Existen dos enfoques para la caracterización de los paneles contralaminados: (1) determinación basada en las propiedades mecánicas de las tablas utilizadas, en forma individual, en combinación con ensayos, y (2) determinación basada en ensayos de los elementos de CLT [7]. Dada la variedad de configuraciones posibles de los paneles contralaminados este segundo enfoque resulta menos práctico, en tanto requiere testeos para cada combinación de capas, especies y espesores. El enfoque analítico, en tanto, ofrece una alternativa más general y con menos costo, y puede predecir la resistencia y rigidez de los paneles basado en las propiedades de las tablas que lo componen [8].

Un aspecto central en la determinación de las propiedades mecánicas de los paneles es su resistencia y rigidez al corte de rodamiento. Las capas orientadas en sentido transversal al esfuerzo afectan su capacidad portante, por lo que la magnitud

de la rigidez a flexión efectiva depende en buena medida del módulo de corte rodante de estas capas transversales. Este a su vez depende de una cantidad de factores, tales como la especie de las maderas, su densidad, el espesor de las capas, el contenido de humedad, la configuración del aserrado, el tamaño y geometría de las capas, su sección, etc. [3].

En base a distintos trabajos científicos las normas norteamericanas asumen un módulo de corte rodante $G_{\perp}$ igual a 1/10 del módulo de corte paralelo a las fibras G ($G_{\perp} = G/10$). A su vez, en base a la experiencia y a la literatura existente, el módulo de corte G de los productos de madera en general se establece entre 1/12 y 1/20 del módulo de elasticidad real E , $G=E/16$ para las normas mencionadas. En forma análoga el módulo de elasticidad transversal $E_{\perp}$ se estima en $E/30$ [9]. La Figura 2 muestra el mecanismo de corte por rodamiento en un panel CLT de 5 capas.

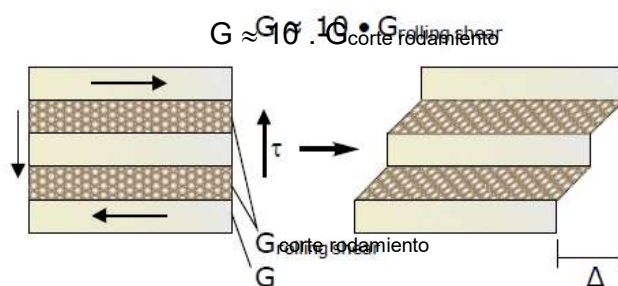


Figura 2: Mecanismo de corte por rodamiento en panel de 5 capas [9]

En la figura se muestra un elemento sometido a esfuerzo de corte producto de la acción de cargas perpendiculares al plano. Las capas transversales se ven exigidas por corte de rodamiento. Dada su baja resistencia a este esfuerzo, la deformación del conjunto del panel se debe casi exclusivamente a la deformación de las capas transversales. Este modelo no cumple con la hipótesis de Bernoulli, por la cual secciones transversales planas del elemento se mantienen planas luego de su deformación. Este comportamiento debe por lo tanto ser tenido en cuenta en la determinación analítica de las características mecánicas de la madera contralaminada [10].

En las últimas décadas se han propuesto diversos modelos matemáticos para definir la capacidad a flexión (resistencia y rigidez) de los paneles de madera contralaminada. Estos consideran a los paneles como elementos que trabajan solo en su dirección principal, por lo que son tratados como franjas de ancho unitario. El primero está basado en la Teoría de las Vigas con Uniones Mecánicas, descrito en el Anexo B del Eurocódigo 5, y es también conocido como Método Gamma. Para su aplicación específica en CLT considerando las capas transversales se ha desarrollado una modificación conocida como teoría compuesta o Método K. El segundo es el Método de Analogía de Corte [11], que en forma similar al anterior utiliza una rigidez efectiva a flexión $(EI)_{eff}$ pero introduce un nuevo término, la rigidez a corte $(GA)_{eff}$, que permite su aplicación en mayor variedad de configuraciones y tipos de cargas. Este método es más preciso y es el utilizado en las normas norteamericanas. Finalmente, la Teoría de Vigas de Timoshenko es una extensión

de la de Euler-Bernoulli, considerando las deformaciones por corte y el efecto de rotación por flexión lo que la hace adecuada para vigas profundas y elementos compuestos tales como CLT. Esta teoría es utilizada ampliamente en diversos programas de computación para el cálculo de madera contralaminada.

Se reseña a continuación el método de analogía de corte, utilizado en la norma norteamericanas. Se lo describe tomando como referencia el Capítulo 3, Anexo A (*Analytical Methods for CLT Floor Panels*) del *Canadian CLT Handbook* [9], utilizando las abreviaturas del original.

Método de la analogía de corte

Este método es el más exacto de los disponibles, permitiendo modelar paneles de cualquier cantidad de capas y tipos de cargas. También permite aproximar la solución de vigas continuas de forma mucho más exacta que los otros métodos. Dadas estas ventajas el método de analogía de corte es el que van adoptando las normativas más actuales [12].

Consiste en idealizar el panel como un elemento compuesto por dos vigas virtuales A y B acopladas por miembros de rigidez infinita, de modo que ambas presentan idénticos desplazamientos verticales en cada punto.

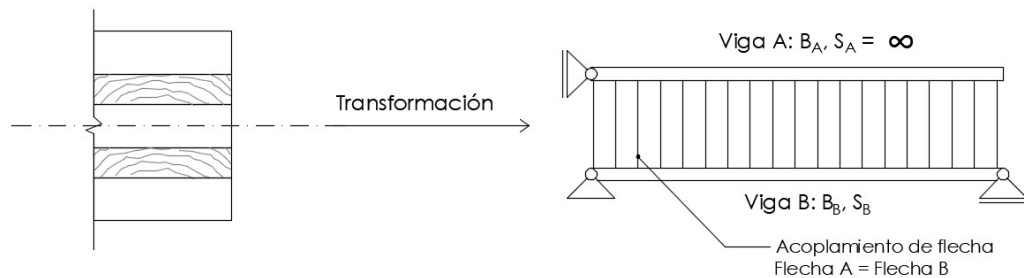


Figura 3: Idealización del panel CLT mediante el método de analogía de corte (adaptado de Guindos, 2019)

La viga A posee la suma de las rigideces a flexión de cada una de las capas longitudinales respecto a su propio eje neutro. La viga B en tanto tiene una rigidez que se corresponde con la contribución de Steiner de las capas longitudinales, es decir la rigidez de cada capa llevada desde su centro de gravedad al eje neutro del panel. La viga A es completamente rígida al corte, mientras que la rigidez al corte de la viga B es la de las capas longitudinales y de las transversales, que actúan como conexiones.

Rigidez a flexión:

De acuerdo a lo visto anteriormente a la viga A se le asigna una rigidez equivalente a la suma de las de cada capa longitudinal respecto a su baricentro:

$$B_A = \sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i = \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_i \cdot \frac{h_i^3}{12} \quad (1)$$

donde:

B_A : $(E \cdot I)_A$

b_i : ancho de cada capa individual, normalmente 1m

h_i : espesor de cada capa individual

Guindos señala que la E_i suele despreciarse para las capas transversales, aunque al ser calculado mediante software con frecuencia se la considera [12]. En tanto en las formulaciones utilizadas en la literatura norteamericana se utiliza $E_{90}=E_0/30$ [9].

La rigidez a flexión de la viga B se obtiene aplicando el teorema de Steiner:

$$B_B = \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 \quad (2)$$

donde:

B_B : $(E \cdot I)_B$

A_i : área de la sección de panel de ancho b_i y espesor h_i . En la notación de normas norteamericanas armonizadas $b_i : t_i$

z_i : distancia desde el baricentro de cada capa al eje neutro del panel

Finalmente, la rigidez a flexión total utilizando la notación de la norma armonizada PRG-320, es la sumatoria de las asignadas a las vigas A y B:

$$(EI)_{eff,y} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_y \cdot \frac{t_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_y \cdot t_i \cdot z_i^2 \quad (3)$$

Se consideran para el cálculo $E_{\parallel}$ para las capas longitudinales y $E_{\perp}$ para las capas transversales.

Rigidez a corte:

Como se ha mencionado la viga A se considera infinitamente rígida a corte, en tanto la viga B también incluye la resistencia al corte y las rigideces de las conexiones, cuando estas existen. La rigidez al corte de esta viga B, S_b es $(GA)_B$, y surge de la siguiente expresión en su formulación original:

$$\frac{1}{S_B} = \frac{1}{a^2} \cdot \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{k_i} + \frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i + b_i} + \frac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b_n} \right] \quad (4)$$

donde:

G_i : módulo de corte longitudinal si la capa "i" es longitudinal, módulo de corte de rodamiento si la capa "i" es transversal.

y,

$$k_i = \frac{K_i}{s_i} \quad (5)$$

K_i : módulo de deslizamiento de las uniones mecánicas (no presente en CLT, por lo que se anula el término)

En consecuencia, la ecuación de la rigidez efectiva al corte para la dirección longitudinal es, utilizando la notación empleada en la norma armonizada ANSI/APA PRG-320:

$$(GA)_{eff,zy} = \frac{(h - \frac{t_1}{2} - \frac{t_n}{2})^2}{\left[\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_y} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{t_i}{G_i \cdot b_y} \right) + \left(\frac{t_n}{2 \cdot G_n \cdot b_y} \right) \right]} \quad (6)$$

Para cada capa se considerará el módulo de corte longitudinal o el de rodamiento, según corresponda.

Resistencia de paneles a esfuerzos perpendiculares a su plano

Este tipo de esfuerzos corresponde normalmente a paneles utilizados para pisos o cubiertas.

Resistencia a la flexión:

El módulo resistente efectivo de la sección, a flexión en sentido longitudinal se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$S_{eff,y} = \frac{(EI)_{eff,y}}{E} \cdot \frac{2}{h} \quad (7)$$

El momento resistente del panel en la dirección longitudinal es:

$$M_{r,y} = F_b \cdot S_{eff,y} \cdot K_{rb,y} \quad (8)$$

Donde la resistencia de diseño a flexión, ajustada, F_b de los componentes de madera se obtiene multiplicando la tensión de diseño especificada para las láminas longitudinales por los siguientes factores de modificación:

- Factor de duración de carga K_D

- Factor de condición de servicio K_S
- Factor de tratamientos K_T
- Factor de sistema K_H

$K_{rb,y} = 0,85$ es el factor de modificación de resistencia para momento flexor (para el cálculo de la resistencia del panel en sentido transversal $K_{rb,x} = 1$).

Resistencia a corte:

La capacidad al corte del panel en el sentido de mayor resistencia se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$V_{r,zy} = F_s \cdot \frac{2 A_{g,zy}}{3} \quad (9)$$

donde:

F_s : resistencia de diseño al corte plano (por rodamiento) de las capas transversales, ajustada mediante los factores de modificación K_D , K_H , K_{SV} , K_T , ($F_s = F_v/3$)

$A_{g,zy}$: área bruta de la sección de panel para la dirección de mayor resistencia

Para determinar la resistencia al corte en la dirección de menor resistencia corresponde utilizar la resistencia al corte de diseño de las capas longitudinales, y para el área bruta se deben excluir las capas longitudinales exteriores en la altura del panel.

Condiciones de servicio para flexión plana: deformación y vibración

El diseño de paneles CLT solicitados por cargas fuera del plano en general está determinado antes por las condiciones de servicio (deformación y vibración) que por estados límites últimos, es decir resistencia [7].

Control de deformaciones:

Para el cálculo de las flechas se deben tener en cuenta las deformaciones por corte. Las normas norteamericanas (CSA-086 y AWC-NDS), con base en el método de analogía de corte, determinan la deformación total mediante la siguiente expresión:

$$\Delta_{max} = \Delta_{st} + \Delta_{LT} \cdot K_{creep} \quad (10)$$

donde,

Δ_{ST} : deformación elástica debida a cargas de corta duración

Δ_{LT} : deformación elástica instantánea debida a cargas de larga duración

K_{creep} : factor de ajuste debido al tiempo, se adopta 2,0 para condición de servicio en estado seco

La deformación bajo una carga distribuida uniforme w , actuando perpendicular al plano de un panel de un solo tramo, se calcula como la suma de las deformaciones por momento y por corte:

$$\Delta = \frac{5}{384} \frac{w \cdot L^4}{(EI)_{eff}} + \frac{1}{8} \frac{w \cdot L^2 \cdot \kappa}{(GA)_{eff}} \quad (11)$$

Para una carga concentrada P , actuando perpendicular al panel de un solo tramo y ubicada en su centro, la deformación se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{1}{48} \frac{P \cdot L^3}{(EI)_{eff}} + \frac{1}{4} \frac{P \cdot L \cdot \kappa}{(GA)_{eff}} \quad (12)$$

donde:

$(EI)_{eff}$: rigidez efectiva a flexión del panel (ver ecuación 3)

$(GA)_{eff}$: rigidez efectiva a corte del panel (ver ecuación 6)

κ : coeficiente de forma = 1,0

Cuando el proyectista estructural evalúe que el componente de deformación por corte respecto a la deformación total para cargas de duración estándar, tales como nieve o sobrecargas es significativo (por ejemplo luces pequeñas, ménsulas cortas, etc), la deformación por corte se incrementará en un 30% para considerar el efecto de deformación diferida asociado al corte por rodamiento.

En general se aceptan valores límites de $L/180$ para la deformación total considerando deformaciones diferidas (ecuación 10), $L/360$ para la deformación instantánea debidas a cargas de larga duración, y $L/240$ para las de corta duración.

Control de vibración:

Cuando las luces de los paneles utilizados como pisos superan los 4,0 m las vibraciones cobran relevancia en el control de condiciones de servicio. Entre los métodos de cálculo disponibles se pueden citar el dado por el Eurocódigo 5, el propuesto por Hamm y Richter, el método de Hamm y Richter modificado, y el de Hu. Estos métodos verifican frecuencias naturales, criterios de rigidez y aceleraciones debidas a vibración, contra valores considerados admisibles [7].

La norma canadiense CSA 086 presenta un método simplificado de cálculo para la verificación de vibración basado en el desarrollado en la versión 2011 del *CLT Handbook*. Este método tiene como fundamentos los estudios y ensayos llevados a cabo por FPInnovations [9], luego verificados en una cantidad de edificios construidos en Canadá y Estados Unidos.

Se describen a continuación los principios básicos. En el capítulo 7 del *CLT Handbook* se pueden encontrar métodos adicionales para Pisos Mixtos Madera-Hormigón (*TCC Floors*), así como ejemplos de cálculo para diversas situaciones particulares [8]:

La luz máxima de un piso de CLT controlado por vibración, con sus extremos apoyados en elementos rígidos (en paredes portantes, vigas de rigidez adecuada, etc.), puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$L = 0.11 \frac{\left(\frac{(EI)_{eff}}{10^6}\right)^{0.29}}{m^{0.12}} \quad (13)$$

donde:

L : máxima luz controlada por vibración, entre bordes de apoyos (m)

m : masa lineal del panel para 1 metro de ancho (kg/m)

$(EI)_{eff}$: rigidez efectiva a flexión del panel en la dirección de mayor resistencia, para 1 m de ancho (N-mm²)

Esta ecuación corresponde a paneles de un solo tramo, para varios tramos continuos la luz calculada puede incrementarse en un 20% en tanto no supere los 8m.

Para pisos con terminaciones, la ecuación 13 puede utilizarse sin considerar el peso ni rigidez de las mismas en tanto la carga unitaria de la terminación no supere al doble de la del panel. Si fuera mayor se recomienda reducir la luz máxima en un 10%.

Resistencia de tabiques de CLT

Los paneles de CLT utilizados como tabiques pueden verse sometidos a tres tipos de cargas: (i) compresión axial debida a cargas gravitatorias, (ii) cargas laterales actuando en su plano, debidas a cargas horizontales tales como viento o sismo, y (iii) cargas fuera del plano debidas a viento [13].

Verificación para cargas axiales:

Diversos autores coinciden en que para este tipo de solicitaciones solo debe considerarse la sección neta correspondiente a las capas dispuestas en el sentido de los esfuerzos [7]. Debido a ello los paneles habitualmente se disponen con sus caras exteriores paralelas a las cargas gravitatorias:

La resistencia a compresión del panel sometido a una carga axial P_r se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_r = F_c \cdot A_{eff} \cdot K_{ZC} \cdot K_C \quad (14)$$

donde,

F_c : tensión de diseño ajustada en compresión paralela a las fibras, en MPa:

$$F_c = f_c \cdot (K_D \cdot K_H \cdot K_{SC} \cdot K_C) \quad (15)$$

A_{eff} : área efectiva del panel, considerando solo las capas orientadas en el sentido de las cargas, en mm^2

K_{ZC} : factor de tamaño para compresión, según ecuación 16

K_C : factor de esbeltez para elemento comprimido, según ecuación 17

$$K_{ZC} = 6,3 \cdot (2 \sqrt{3} \cdot r_{eff} \cdot L)^{-0,13} \leq 1,3 \quad (16)$$

$$K_C = \left[1,0 + \frac{F_c \cdot K_{ZC} \cdot C_c^3}{35 \cdot E_{05} \cdot (K_{SE} \cdot K_T)} \right]^{-1} \quad (17)$$

donde,

E_{05} : módulo de elasticidad para diseño a compresión de las capas orientadas en el sentido de la carga axial, en MPa

L : largo del panel (alto), en mm

K_{SE} : factor de modificación para el módulo de elasticidad por condición de servicio, dado que los paneles deben usarse en condición seca $K_{SE} = 1,0$

K_T : factor de tratamiento = 1,0 para paneles sin tratamiento

r_{eff} : radio de giro, según la siguiente expresión:

$$r_{eff} = \sqrt{\frac{I_{eff}}{A_{eff}}} \quad (18)$$

donde I_{eff} es el momento de inercia efectivo del panel considerando solo las capas orientadas en el sentido de las cargas axiales, en mm^4

El coeficiente de esbeltez del panel C_c no debe ser mayor que 43:

$$C_c = \frac{L_e}{\sqrt{12} \cdot r_{eff}} \leq 43 \quad (19)$$

Verificación para combinación de cargas axiales y perpendiculares al plano:

Los paneles sometidos a esfuerzos de flexocompresión (por ejemplo gravitatorias + viento) deben satisfacer la siguiente condición:

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r} \left[\frac{1}{1 - \frac{P_f}{P_{E,v}}} \right] \leq 1 \quad (20)$$

donde,

P_f : carga de compresión solicitante

P_r : resistencia a compresión, calculada de acuerdo a la ecuación 14

M_f : momento flexor solicitante

M_r : momento flexor resistente, calculado de acuerdo a la ecuación 8

$P_{E,v}$: carga crítica de Euler ajustada considerando deformación por corte, calculada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_{E,v} = \frac{P_E}{1 + \frac{\kappa \cdot P_E}{(GA)_{eff}}} \quad (21)$$

donde,

κ : coeficiente de forma para corte, se considera =1 al utilizar el método de Kreuzinger (analogía de corte)

$(GA)_{eff}$: rigidez efectiva a corte en el plano, considerando todas las capas y calculada según la ecuación 6

P_E : carga crítica de Euler calculada según la siguiente ecuación, donde I_{eff} y E_{05} se determinan considerando solo las capas orientadas en sentido paralelo a la carga axial:

$$P_E = \frac{\pi^2 \cdot E_{05} \cdot I_{eff}}{(K_e \cdot L)^2} \quad (22)$$

Referencias¹

- [1] M. Jeleč, D. Varevac, y V. Rajčić, «Cross-laminated timber (CLT), a state of the art report», *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, vol. 70, n.º 02, pp. 75-95, 2018.
- [2] M. Kleinhenz, S. Winter, y P. Dietsch, «Eurocode 5 - A Halftime Summary of the Revision Process», presentado en World Conference on Timber Engineering, Viena, Austria, 2016.
- [3] E. Karacabeyli y B. Douglas, *CLT handbook: cross-laminated timber*. FPInnovations & Binational Softwood Lumber Council, 2013.
- [4] J. C. Piter, «Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para el Eucalyptus grandis de Argentina», tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata, 2003.
- [5] D. Godoy, «Paneles contralaminados con maderas de bajas propiedades mecánicas», tesis doctoral, Universidad del Bío-Bío, Chile, 2018.
- [6] G. Medina, «Noticias de Normalización. Norma Europea de la Madera Contralaminada: UNE-EN 1635», Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera. Accedido: 29 de noviembre de 2020. [En línea]. Disponible en: https://infomadera.net/uploads/descargas/archivo_56_Art%C3%ADculo%20Norma%20de%20MCL.pdf
- [7] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, y A. Thiel, «Cross laminated timber (CLT): overview and development», *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, n.º 3, pp. 331-351, may 2016.
- [8] E. Karacabeyli y S. Gagnon, *Canadian CLT Handbook*, vol. 1. Canada: FPInnovations. Vancouver, Canada, 2019.
- [9] L. Hu, S. Gagnon, Y. H. Chui, y S. Cui, «Chapter 7: Vibration performance of cross-laminated timber floors», en *Canadian CLT Handbook*, Canada: FPInnovations, 2019.
- [10] P. Mestek y H. Kreuzinger, «Design of Cross Laminated Timber (CLT)», presentado en 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan, 2008.
- [11] H. Kreuzinger, «Platten, Scheiben und Schalen – ein Berechnungsmodell für gängige Statikprogramme.», *Bauen mit Holz*, vol. 1, pp. 34-39, 1999.
- [12] P. Guindos, *Conceptos avanzados del diseño estructural con madera. Parte II: CLT, Modelación numérica, Diseño anti-incendios y Ayudas al cálculo*. Ediciones Universidad Católica de Chile, 2019.
- [13] M. Popovski, S. Gagnon, M. Mohammad, y C. Zhiyong, «Chapter 3: Structural design of cross-laminated timber elements», en *Canadian CLT Handbook*, Canada: FPInnovations, 2019.
- [14] R. Alfie, «Sistema estructural con madera contra-laminada (CLT): Evaluación de normas y reglas de diseño a nivel internacional y propuesta para su inclusión en el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSCOC 601.», Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, 2022.

¹ Este trabajo constituye un extracto de la Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural del Autor.[14]