

ENTREPISOS DE DLT - OPORTUNIDADES DE UN SISTEMA ESTRUCTURAL 100% DE MADERA REGLAMENTADO EN ARGENTINA

Roberto Batalla (*is_robert@hotmail.com*)

Universidad Nacional de Formosa, Facultad de Recursos Naturales
(UNaF-FRN) - Arg.

Palabras clave: madera, DLT, Brettstapel, CIRSOC, entrepiso

Los paneles de Madera Laminada con Espigas, mejor conocidos como DLT (por sus siglas en inglés: Dowel Laminated Timber), son uno de los más novedosos Productos de Madera de Ingeniería o EWP (Engineered Wood Products) que pueden ser utilizados como elementos estructurales en techos, entrepisos y muros. Estos paneles sólidos de madera usan espigas de madera dura para unir, por fricción, tablas previamente fresadas en sus bordes, creándose así un panel que es particularmente eficiente para luces horizontales, y que permite mucha flexibilidad arquitectónica.

En Argentina, la aprobación y puesta en vigencia legal en todo el país del primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera - CIRSOC 601, en noviembre de 2016, finalmente nos permite contar con una regulación nacional para las estructuras hechas con dicho material.

En este trabajo, a modo de introducción, se exponen las ventajas de la madera como material de construcción renovable y sustentable, frente a los materiales convencionales no renovables (hormigón armado y acero); para brindar posteriormente, de manera detallada, una descripción de los paneles de DLT, su proceso constructivo y las aplicaciones en la industria de la construcción.

Finalmente, se describe la metodología de diseño estructural de un panel de DLT en base al Reglamento CIRSOC 601-2016, para usarlo como entrepiso de madera; incluyendo un ejemplo numérico para una mejor apreciación. Demostrada la metodología, se propone una guía de diseño como herramienta que facilite su dimensionamiento; sirviendo la misma como estrategia de fomento de su uso.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha estado impulsando el uso de la madera en la construcción, resaltando sus bondades como material sustentable y renovable (a diferencia del acero o el hormigón). Así, sistemas constructivos, como los de Mass Timber (madera masiva o maciza) y edificios en madera cada vez más altos, continúan avanzando en todo el mundo.

Argentina tampoco escapa a esta tendencia internacional, a pesar de no tener una tradición en la construcción con madera, por lo que podemos destacar algunas medidas que en los últimos años se han llevado a cabo para promocionar su uso en la construcción, como ser:

La redacción del primer Reglamento Argentino para Estructuras de Madera, Reglamento CIRSOC 601; trabajo iniciado en 2011 y finalizado en 2013, posteriormente ampliado en 2015; y cuya aprobación y puesta en vigencia legal se llevó a cabo en noviembre de 2016.

La promoción del sistema constructivo de entramados ligeros de madera, el cual obtuvo un CAT (Certificado de Aptitud Técnica) como "Vivienda Sustentable de Alta Prestación", en 2013, para luego incorporarse en 2015, como un modelo financiable en el Programa Crédito Argentino (PROCREAR) del Gobierno Nacional, y finalmente, en enero de 2018, pasar a considerarse "Sistema Constructivo Tradicional", según Resolución 3-E/2018 de la Secretaría de Vivienda y Hábitat de la Nación.

La firma del Convenio Marco, en septiembre de 2017, entre autoridades nacionales y representantes del sector forestoindustrial, estableciéndose que el 10% de las viviendas construidas con fondos estatales deberán ser realizadas en madera. El mismo incluye también, fondos para capacitación del sector, créditos blandos, y promoción de las construcciones con madera.

Por ello, en este trabajo se pretende brindar una propuesta de pre-dimensionamiento de entresijos materializados con paneles de Madera Laminada con Espigas –mejor conocidos como Brettstapel o DLT (Dowel Laminated Timber) – en base al Reglamento CIRSOC 601-2016 (en adelante CIRSOC 601); con la convicción de que los mismos pueden ser fácilmente contruidos a pequeña o gran escala industrial.

Así, la intención es aportar una herramienta que facilite diseñar entresijos de edificios con estructuras de madera; en una manera similar al modo en el que actualmente se diseñan los entresijos de viguetas pretensadas de hormigón; muy comunes en las obras de la región.

2. LA MADERA COMO MATERIAL SUSTENTABLE

A diferencia del acero o el cemento, la madera puede ser considerada un material disponible indefinidamente, si la misma procede de prácticas de aprovechamiento y gestión forestal sustentables (bosques certificados), evitándose una tala indiscriminada. Esto le brinda su condición de renovable; un rol fundamental en la construcción sustentable.

A esto se debe sumar su característica única de poseer una huella de carbono negativa, es decir, que su uso ayuda a reducir el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, contribuyendo así a una reducción del efecto invernadero. Esto se debe a que, por un lado, los árboles absorben CO₂ del aire, por medio del proceso de fotosíntesis; y, por otro lado, la transformación de la madera en un producto de uso en la construcción (vigas, columnas, etc.) se realiza con medios mecánicos, donde el consumo de energía es menor que en la producción de cemento o acero, que necesitan hacer uso de grandes hornos de fundición. En la tabla 1 se presentan datos comparativos para los materiales de construcción más comunes.

Tabla 1. Energía consumida y CO₂ emitido y almacenado en la fabricación de materiales para la construcción (Argüelles; 2013).

| Material | Energía consumida | CO ₂ emitido | CO ₂ almacenado |
|-----------------|-------------------|-------------------------|----------------------------|
| | MJ/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ |
| Madera aserrada | 750 | 15 | 250 |
| Acero | 266.000 | 5.230 | 0 |
| Hormigón | 4.800 | 120 | 0 |
| Aluminio | 1.100.000 | 2.200 | 0 |

3. LOS PANELES DE DLT O MADERA LAMINADA CON ESPIGAS

Los paneles de DLT pertenecen a los productos denominadas como Mass Timber; lo cuales son elementos sólidos bidimensionales. Esta característica de monolitismo diferencia a los mismos de los paneles de entramados livianos de madera (Light Frame). Los mismos pueden ser utilizados como elementos estructurales en muros, techos y entresijos (figura 1).

Los paneles de DLT, a diferencia del CLT (Cross Laminated Timber) o el NLT (Nail Laminated Timber), son productos 100% de madera dentro de los denominados Mass Timber, puesto que no involucran el uso de adhesivos ni de clavos en su constitución. La

ausencia de clavos los vuelve más fáciles de trabajar que al NLT, y también resultan más económico y naturales que el CLT (StructureCraft; 2017).



Figura 1. Paneles de DLT utilizados como entrepiso.

El DLT tiene la particularidad de que, en la superficie inferior del panel se puede integrar una amplia variedad de perfiles transversales (figura 2), sin un aumento en el costo de producción. Cada panel pasa a través de una moldeadora, permitiendo una amplia gama de perfiles en la parte inferior del mismo, incluyendo perfiles acústicos de alta performance, que utilizan aislamiento de fibra de madera para absorber el sonido. Esto aporta una variedad de estilos arquitectónicos y de diseño para cada proyecto, característica que no pueden aportar otros sistemas, como el CLT

Los mismos también pueden ser fácilmente procesados usando máquinas de CNC (Control Numérico Computarizado), creando así, paneles que puede contener de manera pre integrada materiales acústicos, o bien conductos para instalaciones eléctricas y otras instalaciones de servicios. Esto puede apreciarse en la figura 3.

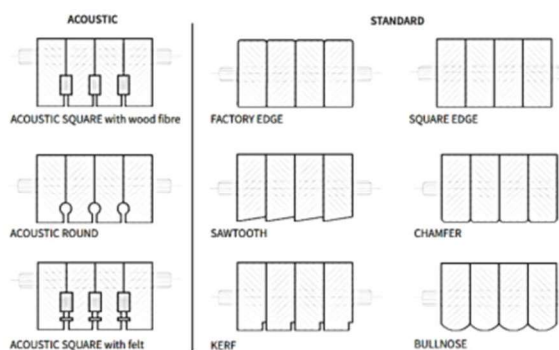


Figura 2. Versatilidad del DLT: Paneles con una variedad de perfiles transversales (StructureCraft, 2017).

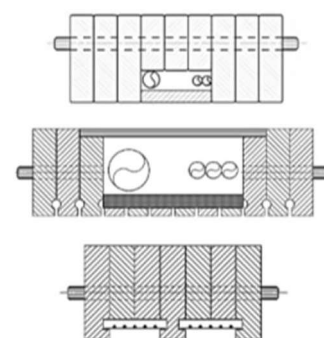


Figura 3. Paneles con espacios para las instalaciones (StructureCraft, 2017).

3.1. Origen del DLT

El concepto de utilizar espigas de madera dura para conectar juntas de madera blanda se concibió en Suiza en los años 90 (StructureCraft; 2017). Primeramente, Julius Natterer encabezó el resurgimiento de los paneles de Madera Laminada Clavada (o NLT “Nail Laminated Timber”) en Europa en los años 70 y 80, puesto que creía que este podía ser un eficiente método de construcción para ser usado en edificaciones, con bajas emisiones de dióxido de carbono y saludables, que sean rápidos y fáciles de construir. Sin embargo, los clavos dentro del NLT hacían imposible el mecanizado en CNC de estos paneles, por lo que la fabricación a mano fue laboriosa.

A principios de la década de los 90, el DLT fue desarrollado por una empresa suiza. Ellos vieron que era posible crear un producto que fuese similar al NLT, pero superior en todos los sentidos: con el DLT únicamente usarían madera, sería factible de producirse con máquinas de CNC, y la producción sería posible de manera automatizada. Entonces procedieron a desarrollar y crear la primera línea de maquinaria automatizada para DLT.

Si bien la fabricación puede realizarse de manera manual y con herramientas simples, hoy día son varias las compañías en Alemania, Austria, Suiza y Norteamérica las que adoptaron esta idea y comenzaron a fabricar DLT de manera comercial, utilizando sistemas automatizados para perforar e insertar los pasadores.

3.2. Proceso de manufactura

Las tablas de madera deben ser secadas a una humedad lo más cercana a la humedad de equilibrio higroscópico, entre un 14 y un 18% aproximadamente, en función del destino de la pieza. Cada una es llevada a través de una moldeadora, asegurándose el espesor exacto de las mismas y aplicando las diferentes opciones de perfiles que se quieran lograr en la parte inferior del panel. Las espigas, en tanto, se fabrican con madera dura, con diámetros variables de entre 12 y 25 mm (Plowas; 2015), y secadas a una humedad de entre el 6% y el 8% (StructureCraft; 2017).

Luego las tablas son colocadas en una prensa, donde se aplican presiones horizontales y verticales para asegurarse de obtener un panel completamente plano y eliminar los espacios entre tablas. Se realizan las perforaciones y se introducen las espigas, por medio de presión hidráulica en los casos industrializados, o golpeándolos con un mazo en fabricaciones más artesanales.

A medida que las espigas van alcanzando la humedad de equilibrio con las tablas que las rodean, se expanden creando una hermética fricción entre los dos materiales.

3.3. Futuro de DLT: Proyecto AFTB

Con el fin de reducir al máximo las emisiones de CO₂ a la atmósfera, y reducir el impacto de la industria de la construcción sobre el efecto invernadero, en Europa no solo se está promoviendo el uso de la madera -único material con huella de carbono negativa- por sobre el acero y el hormigón, sino que, además se están investigando, desarrollando y promoviendo sistemas constructivos que usen el mayor porcentaje posible de madera y que posean una mayor simplicidad constructiva respecto a los sistemas tradicionales.

Es así que, en 2016 se inició un proyecto denominado Towards Adhesive Free Timber Buildings (AFTB – “Hacia Edificios de Madera Libres de Adhesivos”), el cual está financiado por la Interreg North-West Europe, una institución de la Unión Europea (UE); en el que participan universidades de seis países de la UE (Alemania, Bélgica, Francia, Irlanda, Luxemburgo y Reino Unido), coordinadas por la Universidad de Liverpool, y se prevé su finalización para el año 2020.

Este proyecto tiene como finalidad desarrollar y mejorar sistemas constructivos en madera que sean más amigables con el medioambiente, sustituyendo a las conexiones metálicas y a los adhesivos en los productos de madera para ingeniería (por ejemplo, en los paneles de CLT) por elementos de madera. El proyecto AFTB ayudará a las empresas a adoptar la nueva tecnología y producir una gama de productos de madera para ingeniería sin adhesivos. Esto tendrá beneficios adicionales que conducirán a una ventaja competitiva, crecimiento económico y empleos sostenibles. La nueva tecnología también contribuirá a la gestión sostenible de los bosques y los medios de vida rurales conectados, agregando valor a la madera de baja calidad disponible localmente.

Es aquí donde el DLT toma gran protagonismo, puesto que cumplen con los requisitos principales del proyecto: es un producto libre de adhesivos y posee una relativa facilidad de fabricación y construcción. En el proyecto AFTB, incluso se está trabajando en la sustitución de las espigas de madera dura (generalmente de madera de Haya, de crecimiento lento), por espigas de madera blanda comprimida, proveniente de especies de rápido crecimiento, con el fin de hacerlos aún más sustentables. El DLT posee, además, muchas otras ventajas que incluyen la facilidad de recuperar, reusar y reciclar los paneles, una mejor resistencia al fuego de los elementos estructurales ya que las espigas -medios de unión- quedan ocultas dentro de las tablas de madera, y una estanqueidad mejorada de las articulaciones, producto de la expansión de las espigas (Guan; 2018).

La tendencia al uso de sistemas constructivos más sustentables y sostenibles apunta al uso del DLT como principal protagonista, y a la mejora de sus técnicas de fabricación.

3.4. Comportamiento estructural de los entrepisos de paneles de DLT

Si bien los estudios sobre el comportamiento estructural del DLT no son muchos, se ha demostrado que es estructuralmente más eficiente que el CLT para entrepisos y muros armados “en una dirección” (Smith, 2013), debido a que en estos casos todas las fibras están orientadas en la misma dirección en el DLT (figura 4); mientras que no es tan flexible como el CLT para tramos considerados “en dos direcciones” (StructureCraft, 2017), aunque aun así es más barato de fabricar y más fácil. Por tal motivo, en este trabajo se analizarán únicamente los paneles de DLT armados “en una dirección”.

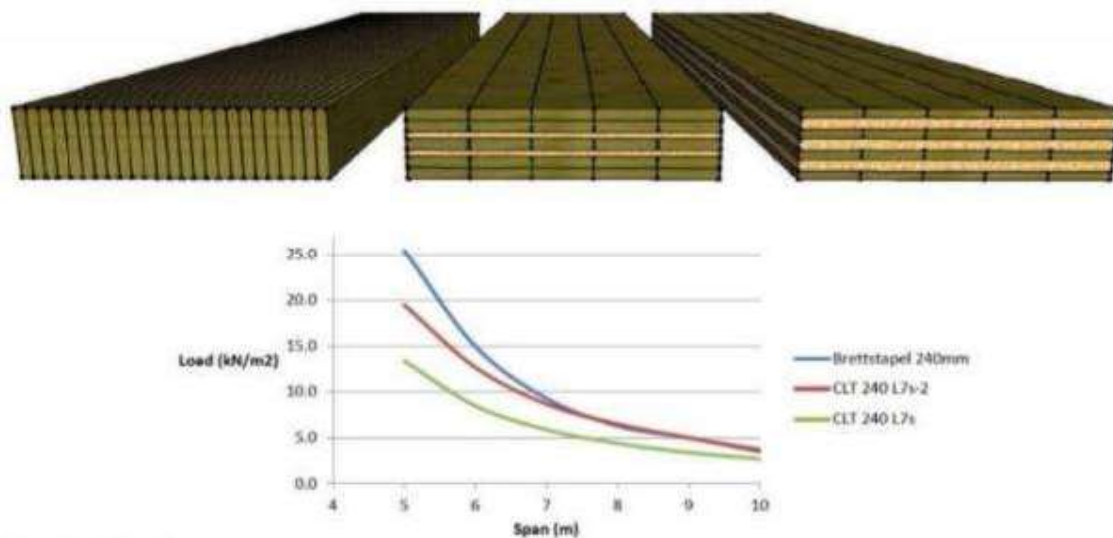


Figura 4. Carga admisible en un panel de DLT armados en una dirección versus dos tipologías de paneles de CLT del mismo espesor (Smith and Wallwork Engineers, 2013).

Con dicha acotación, entonces, un entrepiso de DLT es un sistema que se extiende en una dirección para resistir la carga fuera del plano. Aunque su naturaleza monolítica lo cataloga dentro de los sistemas de Mass Timber, el mismo se puede conceptualizar estructuralmente como un sistema de viguetas de madera dimensionada a flexión, espaciadas entre sí en el ancho de viguetas.

Como bien es sabido, dada la alta relación resistencia/peso de la madera, los requisitos de capacidad de servicio, tales como deflexiones y vibraciones, a menudo rigen el diseño de los elementos de madera sometidos a flexión (Belvisi Irigoyen, 1998).

4. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE LOS ENTREPISOS DE DLT

El CIRSOC 601 define las disposiciones generales y los métodos a emplear en el diseño de las estructuras con madera para edificaciones; considerando los requisitos relacionados con

el comportamiento mecánico y durabilidad de las estructuras; sin tener en cuenta los aspectos relacionados al aislamiento térmico y acústico, ni la resistencia al fuego.

El formato adoptado para el diseño estructural es el de “tensiones admisibles”. Esto significa que las combinaciones de cargas establecidas en el mismo no deben superar las tensiones admisibles –denominadas “de diseño ajustadas”– obtenidas multiplicando las tensiones de diseño de referencia del material por los factores de ajuste especificados (Piter, 2016).

En base al mismo, y por lo descrito anteriormente, un entrepiso materializado por un panel de DLT “en una dirección” debe diseñarse a flexión, casi como si se tratase de una viga; similar a lo que ocurre con una losa de hormigón armado ($H^\circ A^\circ$) en una dirección. Por lo tanto, deberán tenerse en cuenta las resistencias a la flexión y al corte, así como la resistencia a la compresión perpendicular a las fibras en la zona de los apoyos, como estados límites de resistencia, y como condición de servicio controlar las deformaciones y las vibraciones; es decir, deben seguirse las especificaciones del Artículo 3.2, correspondiente a “Miembros Flexionados” y el Artículo 3.6, correspondiente a “Tensiones Transmitidas en los Apoyos”.

Así mismo, las tablas que componen los paneles son de madera aserrada, por lo que también se deben seguir las descripciones del Capítulo 4 “Diseño de Miembros Estructurales de Madera Aserrada”, para obtener los valores de las tensiones de diseño ajustadas, en función de los factores de ajuste de las tensiones y módulos de elasticidad de referencia.

4.1. Modelo de estudio

En el presente trabajo, por cuestiones de extensión, se trabajará con entrepisos de DLT armados en una dirección, simplemente apoyados, y conformados por tablas de secciones rectangulares. El procedimiento puede ser extendido a otras configuraciones de apoyos y de secciones transversales de las tablas, de paneles armados en una dirección, sin mayores complicaciones.

Otra simplificación será la de considerar que el entrepiso es interno al edificio y no una azotea; de manera tal que solo actúen cargas permanentes (cargas D) y de uso (cargas L). Con esto, el análisis de las combinaciones de cargas se reduce a un solo caso límite (combinación D+L; Expresión 1.4-1 del CIRSOC 601). En la figura 5 se representa el modelo propuesto. El mismo se estudiará tomando como ancho unitario una franja de un metro (Piter, 2016), similar a como se diseñan las losas de $H^\circ A^\circ$ “en una dirección”. La adopción de este ancho no es arbitraria, sino que responde a lo siguiente:

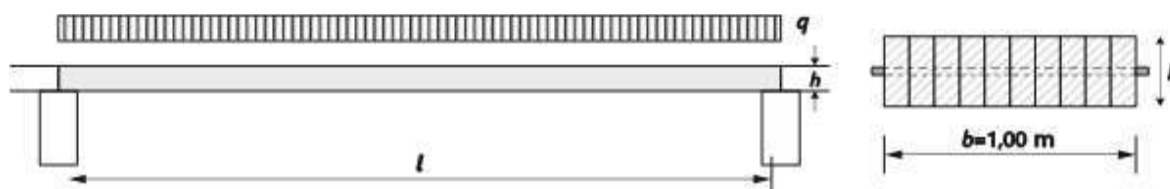


Figura 5. Modelo estructural para el diseño.

Para tener un control de las vibraciones del entrepiso, en el Artículo 3.2.3 del CIRSOC 601 se exige la verificación de un valor máximo de la deformación instantánea producida por una carga concentrada de 1 kN, ubicada en el centro del vano, en los miembros flexionados. Esto responde a la necesidad de simular el paso de una persona. Adoptar como “elemento sometido a flexión” a todo el ancho del entrepiso no tendría concordancia con la realidad, puesto que una carga puntual de 1 kN prácticamente no tiene efectos sobre zonas muy alejadas de su punto de aplicación. Por el contrario, suponer que la carga de 1 kN debería actuar sobre cada tabla que conforma el panel tampoco es realista, y exigiría secciones muy grandes para cumplir la exigencia.

Finalmente, considerando que un fabricante trabaja con una cantidad limitada de perfiles (secciones transversales), en este trabajo se consideró que los paneles se conformarían por tablas con las siguientes dimensiones -en milímetros- de secciones transversales “b x h”: 50x100 (2”x4”); 50x150 (2”x6”); 50x200 (2”x8”); 75x150 (3”x6”) y 75x200 (3”x8”).

4.2. Proceso de diseño

El diseño estructural de un entrepiso de madera consiste básicamente en determinar su mínima altura o espesor, para que, dado un análisis de las combinaciones críticas de cargas que actuarán sobre el mismo, este satisfaga las condiciones de resistencia y serviciabilidad, en base a las prescripciones de los Reglamentos. En el caso de que ya se tengan las dimensiones del entrepiso, que será el caso de estudio aquí, el diseño estructural consiste en determinar la carga admisible del mismo.

En base al CIRSOC 601, se deberán verificar un total de siete condiciones de diseño: tres condiciones por resistencia (tensiones) y cuatro condiciones por serviciabilidad (deformaciones y vibraciones).

Requisitos de resistencia, aplicando los Artículos 3.2 y 3.6 del CIRSOC 601: esfuerzo máximo de flexión (Art. 3.2.1), esfuerzo máximo de corte (Art. 3.2.2) y tensión de compresión perpendiculares a la dirección de las fibras (Art. 3.6.2)

Condiciones de servicio, aplicación el Artículo 3.2.3 del CIRSOC 601: control de la deformación instantánea máxima originada por cargas variables; control de la deformación final neta originada por la totalidad de las cargas; verificación de la rigidez del entrepiso a través de asegurar un valor mínimo de su frecuencia natural de vibración, y control de la deformación instantánea producida por una carga concentrada de 1 kN ubicada en el centro del vano.

Se describen a continuación, los requisitos de resistencia que se deberán cumplir:

Esfuerzo máximo de flexión:

$$f_b = \frac{M_x}{S_x} = \frac{3 q l^2}{4 h^2} \leq F'_b \quad (1)$$

$$M_x = \frac{q l^2}{8} b \quad ; \quad S_x = \frac{b \times h^2}{6} \quad ; \quad q = q_D + q_L \quad (2)$$

Siendo:

- f_b : tensión máxima originada por el momento flector. (N/mm²)
- F'_b : tensión de diseño en flexión ajustada. (N/mm²)
- M_x : momento flexor máximo para un entrepiso simplemente apoyado. (N·mm)
- q : combinación de carga crítica, según Art. 1.4 del CIRSOC 601. (N/mm²)
- q_D : carga permanente, incluido peso propio, por unidad de superficie. (N/mm²)
- q_L : sobrecarga de uso por unidad de superficie. (N/mm²)
- S_x : módulo resistente a la flexión de la sección transversal. (mm³)
- b : ancho considerado (1000 mm) del entrepiso armado en una dirección. (mm)
- h : altura o espesor del entrepiso (mm)
- l : luz de cálculo del entrepiso. (mm)

Esfuerzo máximo de corte:

$$f_v = \frac{(V_x - q h - q a) Q_x}{I_x b} = \frac{3 q (l - 2h - 2a)}{4 h} \leq F'_v \quad (3)$$

$$V_x = \frac{q l}{2} b ; Q_x = \frac{b \times h^2}{8} ; I_x = \frac{b \times h^3}{12} \quad (4)$$

Siendo:

- f_v : tensión máxima originada por el esfuerzo de corte. (N/mm²)
- F'_v : tensión de diseño en corte ajustada. (N/mm²)
- V_x : esfuerzo cortante máximo para un entrepiso simplemente apoyado. (N)
- I_x : momento de inercia de la sección transversal (mm⁴)
- Q_x : momento estático del área debajo del eje baricéntrico de la sección transversal respecto a dicho eje. (mm³)

Tensión de compresión perpendiculares a la dirección de las fibras (Art. 3.6.2)

$$f_{c\perp} = \frac{V_x}{a b} = \frac{q l}{2 a b} \leq F'_{c\perp} \quad (5)$$

Siendo:

- $f_{c\perp}$: tensión máxima originada por el esfuerzo de compresión perpendicular a las fibras en los apoyos. (N/mm²)
- $F'_{c\perp}$: tensión de diseño en compresión perpendicular a las fibras ajustada. (N/mm²)
- a : ancho de apoyo del entrepiso, en general es la mitad del ancho de la viga de apoyo. (mm)

Los requisitos de servicio serán (Artículo 3.2.3):

Control de la deformación instantánea máxima, originada por cargas variables (cargas L).

$$\Delta_{i(V)} = \frac{5}{384} \frac{q_L l^4}{E' I_x} b \leq l/360 \quad (6)$$

Siendo:

- $\Delta_{i(V)}$: deformación inicial debido a la sobrecarga de uso. (mm)
- E' : módulo de elasticidad a la flexión ajustada. (N/mm²)

Control de la deformación final neta originada por la totalidad de las cargas.

$$\Delta_{fnet(TC)} = K_{cr} \Delta_{i(LD)} + \Delta_{i(CD)} \quad (7)$$

Siendo:

- $\Delta_{fnet(TC)}$: deformación final neta para la totalidad de las cargas. (mm)
- $\Delta_{i(LD)}$: deformación instantánea debido a las cargas permanentes y de larga duración. (mm)
- $\Delta_{i(CD)}$: deformación instantánea producida por las cargas de corta duración. (mm)
- K_{cr} : factor de deformación dependiente del tiempo, cuyo valor para madera aserrada es 1,5.

Control de las vibraciones: Control de la rigidez del entrepiso a través de asegurar un valor mínimo de su frecuencia natural de vibración.

$$f_0 = \frac{\pi}{2 l^2} \sqrt{E' I_x / m_{ua}} \geq 8 \text{ Hz} \quad (8)$$

Siendo:

- f_0 : frecuencia natural de vibración del entrepiso. (Hz)
- m_{ua} : masa del entrepiso por unidad de área. (kg/mm²)

Control de la deformación instantánea producida por una carga concentrada de 1 kN ubicada en el centro del vano.

$$\Delta_{i(1kN)} = \frac{P l^3}{48 E' I_x} \leq 7,5 / (l_{[m]}^{1,2}) \leq 1,5 \text{ mm} \quad (9)$$

Siendo:

- $\Delta_{i(1kN)}$: deformación instantánea producida por una carga concentrada de 1 kN ubicada en el centro del vano. (mm)
- P : carga concentrada de 1000 N (1 kN) en el centro del entrepiso. (N)

Partiendo de las siete condiciones detalladas anteriormente, debemos determinar la carga admisible, una vez conocidas todas las restantes variables intervinientes.

Queda, entonces, por determinar las tensiones de diseño y módulo de elasticidad ajustadas, en base a las tensiones de diseño y módulo de elasticidad de referencia. Para determinar las tensiones de diseño en flexión, corte y compresión perpendicular a las fibras ajustadas (F'_b , F'_v y $F'_{c\perp}$) y el módulo de elasticidad ajustado (E'), nos basamos en la Tabla 4.3-1 del Capítulo 4 (Diseño de Miembros Estructurales de Madera Aserrada) del CIRSOC 601, la cual nos indica que se determinan de la siguiente manera:

$$F'_b = F_b \times C_D \times C_M \times C_t \times C_L \times C_F \times C_r \quad (11)$$

$$F'_v = F_v \times C_D \times C_M \times C_t \quad (12)$$

$$F'_{c\perp} = F_{c\perp} \times C_D \times C_M \times C_t \quad (13)$$

$$E' = E \times C_M \times C_t \quad (14)$$

Siendo:

- F_b : tensión de diseño en flexión de referencia del material. (N/mm²)
- F_v : tensión de diseño en corte de referencia del material. (N/mm²)
- $F_{c\perp}$: tensión de diseño en compresión perpendicular a las fibras de referencia. (N/mm²)
- E : módulo de elasticidad longitudinal de referencia del material. (N/mm²)
- C_D : factor de duración de la carga.
- C_M : factor de condición de servicio.
- C_t : factor de temperatura.
- C_L : factor de estabilidad lateral.
- C_F : factor de tamaño.
- C_r : factor de distribución lateral de cargas.

Las variables intervinientes en el diseño estructural del entrepiso, sin considerar a las cargas -incógnitas del problema- se pueden clasificar en tres grupos:

Variables geométricas: las dimensiones que el fabricante adopte para comercializar los paneles. Estas son: sección transversal de las tablas (b_0 , h) y longitud de los paneles (l).

Propiedades mecánicas del material: también definidas por el fabricante, al seleccionar la especie maderera -y su grado de resistencia- con la que trabajará. Las tensiones de diseño y módulo de elasticidad de referencia del material (F_b , F_v , $F_{c\perp}$ y E) se obtienen de los Suplementos del CIRSOC 601, según la especie maderera.

Factores reglamentarios: los valores de los factores de ajustes (C_D , C_M , C_t , C_L , C_F y C_r), obtenidos siguiendo el Artículo 4.3. Se describen, a continuación, los valores de cada factor, para entresijos de DLT utilizado en edificios protegidos de la intemperie (estado seco):

Factor de duración de la carga, C_D : según Tabla 4.3-2 del Reglamento. En este caso, el entresijo solo estará soportando cargas permanentes (q_D) y la sobrecarga de uso (q_L); por lo tanto, se adopta como $C_D = 1,0$.

Factor de condición de servicio, C_M : según la Tabla 4.3-3. Considerando que se trabajará en un estado seco, el factor de condición de servicio toma el valor $C_M = 1,00$.

Factor de temperatura, C_t : la Tabla 4.3-4 nos indica los valores a adoptar. En este caso se considera que el ambiente es interior, con temperaturas $T \leq 40^\circ C$, por lo tanto $C_t = 1,00$.

Factor de estabilidad lateral de la viga, C_L : por sus características constructivas, las tablas del panel están impedidas de pandear lateralmente, por lo tanto, $C_L = 1,00$.

Factor de tamaño, C_F : Se determina con la siguiente expresión:

$$C_F = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \leq 1,3 \quad (15)$$

Siendo:

- h : la altura o espesor de la sección del panel sometido a flexión. (mm)

Factor de distribución lateral de cargas, C_r : las tablas del panel poseen las mismas dimensiones, y además se encuentran conectadas lateralmente por medio de las espigas, entonces se cumple la condición para adoptar como valor, $C_r = 1,10$.

Finalmente, entonces, es posible determinar la carga admisible.

De los tres requisitos de resistencia –expresiones (1), (3) y (5) –, podemos despejar, en cada caso, valores de la carga admisible total ($q = q_D + q_L$).

Del cuarto requisito, de deformación instantánea máxima para cargas variables, se determina la sobrecarga de uso máxima (q_L).

Del control de la deformación final, se puede obtener una carga admisible total ($q = q_D + q_L$).

De la condición de valor mínimo de la frecuencia natural de vibración del entresijo, se despeja la masa del entresijo, lo que es en definitiva la carga permanente (q_D) del entresijo.

La última condición, de deformación instantánea para una carga puntual de 1 kN, solo verifica la relación longitud/altura del entresijo, puesto que no intervienen las cargas q en la ecuación. Es decir, se verifica que el espesor adoptado para el entresijo cumpla un valor mínimo.

Es posible realizar una planilla de cálculo en la cual, ingresando estos tres grupos de variables (variables geométricas, propiedades mecánicas del material y factores de ajuste reglamentarios), pueda determinarse automáticamente la carga admisible.

5. RESULTADOS

El diseño de los entresijos de DLT, en la mayoría de los casos, queda condicionado por la deformación final; excepto para los casos de secciones grandes y luces cortas, donde rige el dimensionado por esfuerzo cortante. En la figura 7 se presenta una propuesta de tabla de predimensionado de entresijos de DLT. En el mismo se aclaran la especie maderera y su grado de resistencia, el tipo de apoyo, y los valores de carga admisible total, para diferentes combinaciones de secciones transversales y longitudes de tablas.

| ENTREPISO DE DLT – MADERA LAMINADA CON ESPIGAS | | | | | | | | |
|---|----------------------------|-------|-------|-------|--------------------------------------|-------|-------|------|
| CARGA DISTRIBUIDA ADMISIBLE (kN/m^2) | | | | | | | | |
| ESQUEMA ESTRUCTURAL: Simplemente apoyado | | | | | ESPECIE MADERERA: Eucaliptus grandis | | | |
|  | | | | | RESISTENCIA: Grado 2 | | | |
| Sección (mm) | Longitud del panel "l" (m) | | | | | | | |
| | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 3,50 | 4,00 | 4,50 | 5,00 | 6,00 |
| 50 x 100 | 22,39 | 11,11 | 6,30 | 3,91 | 2,59 | 1,80 | 1,31 | 0,75 |
| 50 x 150 | 75,58 | 37,50 | 21,26 | 13,19 | 8,74 | 6,09 | 4,41 | 2,52 |
| 75 x 150 | 75,58 | 37,50 | 21,26 | 13,19 | 8,74 | 6,09 | 4,41 | 2,52 |
| 50 x 200 | 112,28 | 72,12 | 49,39 | 31,26 | 20,72 | 14,43 | 10,44 | 5,98 |
| 75 x 200 | 112,28 | 72,12 | 49,39 | 31,26 | 20,72 | 14,43 | 10,44 | 5,98 |

Figura 7. Propuesta de Tabla de diseño de entresijos de DLT.

6. CONCLUSIONES

Los paneles de DLT son hechos en un 100% de madera y poseen una relativa facilidad de fabricación, constituyendo así, un sistema estructural factible de utilizar en entresijos; con un fuerte componente de sustentabilidad y sostenibilidad, que aporta a la reducción de emisiones de CO₂, con una mejor performance que el CLT, que es hoy día el sistema de Mass Timber más difundido. Además, el CIRSOC 601 nos permite su diseño estructural sin grandes complicaciones, a pesar de la cantidad de factores que intervienen. Estas características, sumadas a la abundancia de bosques implantados que tenemos en el país, favorecen las condiciones para su fabricación y utilización en la Argentina.

En cuanto a la confección de tablas de predimensionado, estas deben indicar la especie maderera y grado de resistencia, y los tipos de carga que se consideran actuando, ya que la duración de las mismas afecta considerablemente a las tensiones de diseño.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Argüelles Álvarez, R; Arriaga Martitegui, F.; Herrero, M.E.; Gonzalez, G. I.; Argüelles Bustillo, R. (2013). *Estructuras de madera – bases de cálculo*. Editorial AITIM – Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera. Madrid, España. Capítulo 1. Introducción.
- Belvisi Irigoyen, D.S.; Blanc, P.F.; Calvo C.F.; Cotrina A.D.; Cuffré A.G.; Larocca F.D.; Piter, J.C.; Torrán, E.A.; Villalba, D.I. (1998). *Diseño en flexión según el Eurocódigo 5 Parte 1-1*. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay.
- Bradley, D. (2018) *Towards adhesive free timber buildings: an international research collaboration*. TRADA – The Timber Research and Development Association. Disponible en: <https://www.trada.co.uk>
- Guan, Z; Sotayo, A; Oudjene, M; El Houjeyri, I.; Harte, A. M.; Mehra, S; Haller, P; Namari, S; Makradi, A; Belouettar, S; Deneufbourg, F. (2018) *Development of adhesive free engineered wood*

- products – Towards adhesive free timber buildings. 2018 World Conference on Timber Engineering – WCTE 2018, Seúl, República de Corea.*
- Holt, R; Luthi, T; Dickof, C. (2017). *Nail-laminated timber: U.S. design & construction guide v1.0. Binational Softwood Lumber Council. Chapter 4: Structure. Disponible en <https://www.thinkwood.com>.*
 - Piter, J. C. (2016) *Manual de aplicación de los criterios de diseño adoptados en el reglamento argentino de estructuras de madera. INTI-CIRSOC – Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Capítulo M.4.E.1. Disponible en <https://www.inti.gob.ar/cirsoc>.*
 - Piter, J. C. (2016). *Reglamento argentino de estructuras de madera, CIRSOC 601-2016. INTI-CIRSOC Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Capítulos 1 al 4. Disponible en <https://www.inti.gob.ar/cirsoc>.*
 - Plowas, W.; Bell, T.; Hairstans, R.; and Williamson, J. (2015) *Understanding the compatibility of UK resource for dowel laminated timber construction. Edinburgh Napier University, Scotland.*
 - Smith, S. (2013). *CLT: cross laminated timber or consumes lots of timber. Smith and Wallwork Engineers. Cambridge, Reino Unido. Disponible en: <http://www.smithandwallwork.com>.*
 - StructureCraft (2017). *Mass timber design guide: dowel laminated timber, the all wood panel. StructureCraft Builders Inc., British Columbia, Canada. Disponible en <https://structurecraft.com>.*
 - StructureCraft (2017). *Dowel laminated timber: profile handbook. StructureCraft Builders Inc., British Columbia, Canada. Disponible en <https://structurecraft.com>.*