

DISEÑO DE ENTREPISOS DE MADERA LAMINADA CON ESPIGAS SEGÚN REGLAMENTO CIRSOC 601-2016

Batalla, Diego Roberto; Quiroga, Mirtha Ramona
Ingeniero Civil; Ingeniera en Construcciones
Universidad Nacional de Formosa. Formosa, Argentina.
rbatalla@formosa.gob.ar; mquiroga@gmail.com

RESUMEN

La Madera Laminada con Espigas es uno de los más novedosos productos de madera maciza que puede ser utilizado como elemento estructural en techos, entresijos y muros. Estos paneles sólidos de madera usan espigas de madera dura para unir por fricción tablas previamente fresadas en sus bordes, creando así un panel que es particularmente eficiente para luces horizontales, y que permite mucha flexibilidad arquitectónica.

La aprobación y puesta en vigencia legal en todo el país del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera - CIRSOC 601, en noviembre de 2016, nos permite por primera vez contar con una regulación nacional para estructuras hechas de dicho material.

En este trabajo, se pretende dar una propuesta de diseño estructural en base a la mencionada reglamentación, para entresijos de madera realizados con el sistema denominado Madera Laminada con Espigas, también conocido como DLT. Además del desarrollo teórico, se brinda un ejemplo numérico, para una mejor apreciación de la metodología.

Finalmente, se presenta una guía de diseño a los fines de contar con una herramienta que permita un predimensionado, para casos simplificados.

ABSTRACT

Dowel Laminated Timber is one of the most innovative mass timber products that can be used for roof, floor and wall structures. These solid wood panels use hardwood dowels to friction fit pre-milled boards together on edges, creating a panel which is particularly efficient for horizontal spans, and that allows for much architectural flexibility.

The approval and legal implementation of the Argentine Regulation of Timber Structures - CIRSOC 601, in November 2016, allows us for the first time to count with a national regulation for structures made of this material.

In this work, it is intended to give a structural design proposal based on that regulation for timber mezzanine floors made with the system called Dowel Laminated Timber. In addition to the theoretical development, a numerical example is offered for a better appreciation of the methodology.

Finally, a design guide is presented to have a tool that allows a preliminary design,

for simplified cases.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha estado impulsando el uso de la madera en la construcción, y en particular en el ámbito de las estructuras; resaltando sus bondades, como ser su buen comportamiento frente al fuego, capacidad de almacenamiento de CO₂, y menor consumo energético en su fabricación, entre otras. Sistemas constructivos, como los de madera maciza - “*mass timber*”, en inglés- y edificios cada vez más altos continúan avanzando en todo el mundo.

Argentina, si bien es un país como poca tradición en el uso de la madera en la construcción, tampoco escapa a esta tendencia internacional; por lo que podemos destacar las medidas más importantes que en los últimos años se han llevado a cabo para promocionar el uso estructural de la madera:

- **Junio de 2012:** Se inicia la discusión pública del primer Reglamento Argentino para Estructuras de Madera, Reglamento CIRSOC 601, cuya redacción final se realiza en julio de 2013.
- **Noviembre de 2013:** El sistema constructivo tipo canadiense con madera obtiene el Certificado de Aptitud Técnica, como “Vivienda Sustentable de Alta Prestación”.
- **Abril de 2015:** El PROCREAR. (Programa Crédito Argentino), comenzó a incluir entre sus modelos de vivienda financiables, uno construido íntegramente con madera, diseñado “*respetando las normativas del Reglamento CIRSOC 601*”.
- **Noviembre de 2016:** El Reglamento CIRSOC 601 es aprobado y puesto en vigencia legal en todo el país; previa actualización en junio del mismo año, donde se incorporaron nuevas especies madereras.
- **Septiembre de 2017:** Se firma un Convenio Marco entre autoridades nacionales y representantes del sector foresto industrial, estableciéndose que el 10% de las viviendas construidas con fondos estatales deberán ser realizadas en madera.
- **Enero de 2018:** El sistema constructivo de entramado de madera es considerado construcción tradicional, por la Secretaría de la Vivienda y Hábitat de la Nación; eliminándose así la necesidad de tramitación del CAT – Certificado de Aptitud Técnica, para este sistema constructivo.
- **Marzo de 2018:** El INTI-CIRSOC publica su “Guía de Aplicación para el Proyecto de Estructuras de Madera de Bajo Compromiso Estructural”, apuntado a ayudar en el diseño de viviendas de madera de una planta.

Por ello, en este trabajo se pretende brindar una propuesta de dimensionamiento de entresijos de madera materializados con paneles de Madera Laminada con Espigas, en base a las normativas establecidas en el Reglamento CIRSOC 601-2016; convencidos de que los mismos pueden ser fácilmente construidos tanto a escala industrial de manera automatizada, como así también en pequeños aserraderos y con una tecnología básica.

De esta manera, se pretende brindar un aporte hacia los profesionales, que les facilite diseñar entresijos de edificaciones con estructuras de madera; en una manera que se asemeje al modo en el que actualmente se diseñan, por ejemplo, los entresijos de viguetas pretensadas de hormigón; muy comunes en las obras de la región.

LOS PANELES DE MADERA LAMINADA CON ESPIGAS O DLT

Los paneles de Madera Laminada con Espigas, mejor conocidas como DLT por sus siglas en inglés (*Dowel Laminated Timber*) pertenecen a la familia de productos de madera denominadas como *Mass Timber* o Madera Maciza; lo cuales son elementos sólidos bidimensionales. Esta característica es la que los diferencian de los entramados livianos de madera o bastidores que son de alma calada.

A los productos de madera maciza los podemos subclasificar en dos grupos: los que utilizan pegamento para unir las piezas que lo conforman, y los productos que utilizan otros medios de unión (Tabla 1). En esta última categoría se incluye al DLT, por utilizar espigas de madera como forma de unir sus piezas componentes.

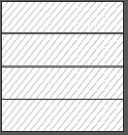

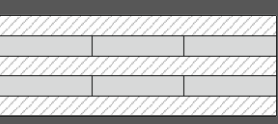
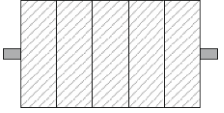
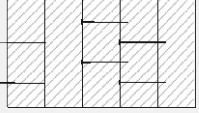
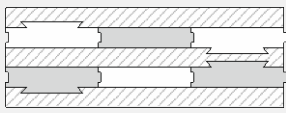
Encoladas	 Glued Laminated Timber GLT	 Structural Composite Lumber SCL	 Cross Laminated Timber CLT
No encoladas	 Dowel Laminated Timber DLT	 Nail Laminated Timber NLT	 Interlocking Cross-Laminated Timber ICLT

Tabla 1. Productos de madera maciza o *mass timber*

Los paneles de DLT, a diferencia del CLT (*Cross Laminated Timber*) o el NLT (*Nail Laminated Timber*), son los únicos productos 100% de madera dentro de los denominados *Mass Timber*, puesto que no involucran el uso de pegamentos ni clavos. Los mismos pueden ser fácilmente procesados usando máquinas de CNC (Control Numérico Computarizado), creando un panel de alta resistencia que también puede contener de manera pre integrada materiales acústicos, conductos eléctricos, y otras instalaciones de servicios. La ausencia de clavos los vuelve más fáciles de trabajar que al NLT, y son más económico y naturales que el CLT por el no uso de adhesivos.

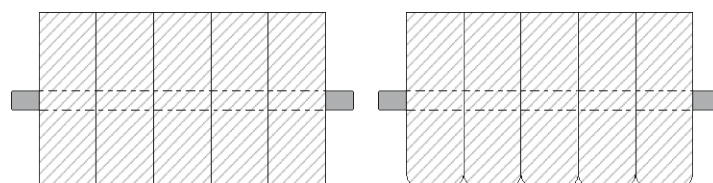


Figura 1: Sección transversal estándar (izq.) y biselada (der.) en un panel de DLT

El DLT tiene la particularidad de que se puede integrar en la superficie inferior del panel una amplia variedad de perfiles transversales, sin un aumento en el costo de producción. Cada panel -unido previamente mediante junta *finger*, si la longitud deseada lo requiere- pasa a través de una moldeadora, permitiendo una gama ilimitada de diferentes perfiles en la parte inferior del mismo, estos incluyen perfiles acústicos de alta performance, que utilizan aislamiento de fibra de madera para absorber el sonido.

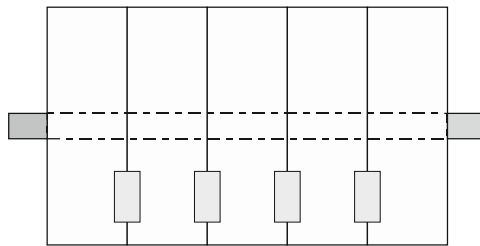


Figura 2. Panel DLT con perfil transversal acústico con fibras de madera.

NACIMIENTO DEL DLT

El concepto de utilizar espigas de madera dura para conectar juntas de madera blanda se concibió en Suiza en los años 90. Julius Natterer encabezó el resurgimiento de los paneles de Madera Laminada Clavada o NLT en Europa en los años 70 y 80, puesto que él creía que este podía ser un eficiente método de construcción que podía ser usado para construir edificios hermosos, con bajas emisiones de dióxido de carbono y saludables, que sean rápidos y fáciles de construir.

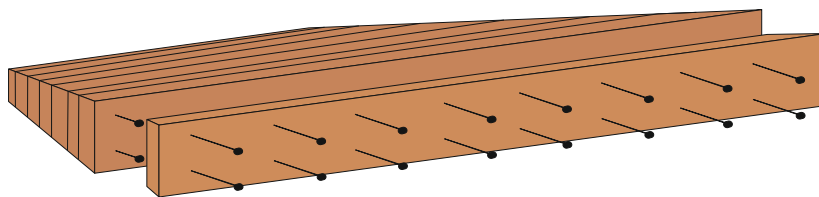


Figura 3. Panel de NLT o Madera Laminada Clavada

A principios de la década de los 90, el DLT/dübel-holz fue desarrollado por una empresa suiza. Ellos vieron que era posible crear un producto que fuese superior al NLT/brett-stapel 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.

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 travez 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, y secadas a una humedad de entre el 6% y el 8%.

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.



Figura 4. Proceso de fabricación de un panel de DLT

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.

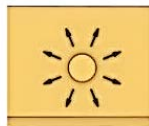


Figura 5. Expansión de la espiga hasta lograr la humedad de equilibrio

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOS ENTREPISOS DE DLT

Los datos publicados sobre el comportamiento estructural del DLT son aún muy limitados. Varios estudios han demostrado que el DLT es estructuralmente más eficiente que el CLT para entresijos y techos armados “en una dirección”, debido a que en estos casos se usa una sola capa de tablas de madera; mientras que no es tan flexible como el CLT para tramos considerados “en dos direcciones” debido a

que la placa falla al fallar una sola de las capas; sin embargo, es bastante más barato de fabricar, más fácil de diseñar y de obtener aprobaciones porque ha estado en los reglamentos de construcción desde los primeros códigos. Por tal motivo, se analizarán en este trabajo, únicamente los paneles de DLT armados “en una dirección”.

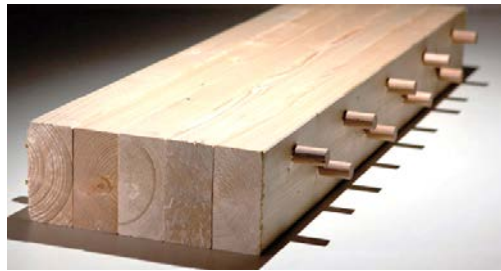


Figura 6. Panel de DLT armados en una dirección.



Figura 7. Panel de DLT armados en dos direcciones.

Con dicha acotación, entonces, un entrepiso de DLT en una dirección 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, como espaciadas en el ancho de viguetas. Un DLT puede consistir en cualquier especie, grado y dimensiones de madera. La resistencia y serviciabilidad del DLT debe cumplir con los requisitos mínimos de los códigos y normas aplicables.

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 pisos de DLT

DISEÑO ESTRUCTURAL SEGÚN REGLAMENTO CIRSOC 601-2016

El Reglamento CIRSOC 601/2016 -Reglamento Argentino de Estructuras de Madera- 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.

El formato adoptado por el Reglamento, para el diseño estructural es el de las

“tensiones admisibles”. Esto significa que las combinaciones de cargas establecidas en el mismo no deben superar las tensiones admisibles, obtenidas mediante el ajuste de las tensiones de referencias del material, para cada tipo de sollicitación.

La acción del fuego sobre las estructuras no se contempla en el CIRSOC 601-2016.

En base al mismo, y por lo descrito anteriormente, un entrepiso materializado por un panel de DLT “en una dirección” debe dimensionarse a flexión, casi como si se tratase de una viga. Por lo tanto, deberán tenerse en cuenta las resistencias a flexión y al corte, como estados límites de resistencia; y como condición de servicio verificar el control de las deformaciones y de las vibraciones, es decir, deben seguirse las especificaciones del Artículo 3.2, que es el correspondiente a “Miembros Flexionados. También en los extremos apoyados se debe aplicar el Artículo 3.6, correspondiente a “Tensiones Transmitidas en los Apoyos”.

Las tablas que componen el panel son de madera aserrada, por lo que también se deben seguir las especificaciones descriptas en el Capítulo 4 “Diseño de Miembros Estructurales de Madera Aserrada”, para obtener los valores de los factores de ajuste de las tensiones y módulos de elasticidad de referencia.

Ecuaciones que gobiernan el diseño a flexión

Diseñar un entrepiso de madera consiste básicamente en determinar su espesor, puesto que las dimensiones en planta (ancho y largo) ya son definidas, por lo tanto, el problema en un entrepiso de DLT “en una dirección” consiste en determinar la altura “h” de la sección transversal de las tablas que conformarán el panel.

A continuación, se describen las ecuaciones que deben verificarse, según el Reglamento CIRSOC 601-2016, para las condiciones mencionadas anteriormente.

Se utilizará para el análisis, un ancho unitario de entrepiso, $b = 1,00$ m (Fig. 8).

Se considera también en este estudio, que el entrepiso es de un solo tramo, con una carga distribuida constante “q”, y la sección transversal de las tablas es rectangular - estándar- y constante, no teniendo entalladuras.

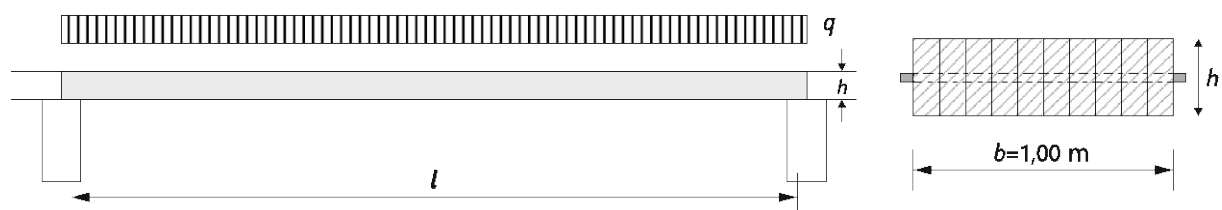


Figura 8. Esquema del entrepiso en análisis: vista en corte y sección transversal.

Debido a la extensión de este trabajo, no se incluye el estudio de las tensiones producidas por la expansión de las espigas al alcanzar la humedad de equilibrio con las tablas del panel; aunque se darán recomendaciones acerca de las distancias mínimas a respetar, en base a lo que el CIRSOC 601-2016 brinda para elementos tipo clavija con diámetros mayores a 6,35 mm.

Las exigencias reglamentarias del CIRSOC 601-2016, para un entrepiso de madera son las siguientes:

Resistencia a flexión:

La máxima tensión originada por el momento flector, f_b , no debe exceder en ningún caso la tensión de diseño en flexión ajustada, F'_b , es decir:

$$f_b = \frac{M}{S} \leq F'_b = F_b \times C_D \times C_M \times C_t \times C_L \times C_F \times C_r ; S = \frac{b h^2}{6} ; M = \frac{q l^2}{8} \quad (1)$$

Resistencia al corte:

La tensión máxima derivada del esfuerzo de corte actuante, f_v , no debe exceder en ningún caso la tensión de diseño en corte ajustada, F'_v :

$$f_v = \frac{V Q}{I b} = \frac{3 V}{2 b h} \leq F'_v = F_v \times C_D \times C_M \times C_t ; V = \frac{q l}{2} \quad (2)$$

Control de las deformaciones instantáneas y finales:

Las deformaciones instantáneas, Δ_i , y diferidas (finales), Δ_f , no deben superar los valores límites proporcionados por el Reglamento, en su Tabla 3.2.3-1. En edificaciones destinadas a viviendas y oficinas son:

$$\Delta_{i(V)} = \frac{5 q l^4}{384 E' I} \leq l/360 ; I = \frac{b h^3}{12} ; E' = E \times C_M \times C_t \quad (3)$$

$$\Delta_{f(TC)} = K_{cr} \Delta_{i(LD)} + \Delta_{i(CD)} \leq l/300 \quad (4)$$

En la expresión (3) la deformación instantánea debe verificarse para la carga variable más desfavorable de la expresión 1.4-1 de Reglamento CIRSOC 601-2016, a saber, la mayor de las siguientes tres cargas:

$$\sum L_i \text{ ó } W \text{ ó } T ; \text{ donde: } \sum L_i = L + L_r + S + R + H \quad (5)$$

En la expresión de la deformación final o diferida, (ecuación 4), $\Delta_{f(TC)}$ indica la deformación final para la **totalidad de las cargas**, donde $\Delta_{i(LD)}$ corresponde a la deformación inicial debido a las cargas de larga duración, como ser la carga permanente y -conservativamente- la sobrecarga de uso (cargas D y L, respectivamente), mientras que $\Delta_{i(CD)}$ indica las deformaciones instantáneas debido a cargas de corta duración, es decir, las cargas de viento, W, de nieve, S, etc.

Control de las vibraciones:

En este caso, para controlar la rigidez del entrepiso, de manera tal que las acciones dinámicas o vibraciones inducidas por el tránsito humano no perjudiquen el confort ni la funcionalidad de la estructura, se pide que la frecuencia natural de vibraciones del entrepiso, f_0 , no supere los 8 Hz:

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{E' I}{m_{ua}}} \geq 8 \text{ Hz} \quad (6)$$

Aquí, m_{ua} es la masa total del entrepiso, por unidad de área; la cual incluye no solo la masa de las tablas que conforman el panel estructural, sino también los demás componentes no estructurales que conforman el entrepiso.

En la bibliografía 5 se recomienda considerar, además, que un porcentaje (50%) de la sobrecarga de uso actúa en forma simultánea con el peso propio, como “carga permanente”, de manera tal de suponer un estado de carga más acorde a la realidad.

A su vez, en el Reglamento, se exige que la deformación instantánea que produciría una carga concentrada de 1 kN ubicada en el centro del vano, $\Delta_{i(1kN)}$, no supere los siguientes límites:

$$\Delta_{i(1kN)} \leq 7,5/l_{[m]}^{1,2} \leq 1,5 \text{ mm} \quad (7)$$

En esta expresión, $l_{[m]}$ es la luz de la viga, expresada en metros.

En este punto debemos hacer la siguiente aclaración:

El Reglamento indica que la carga aplicada en el centro del vano debe tener un valor de 1 kN, sin discriminar las dimensiones de la viga. Por ello, aquí consideramos que el mejor criterio a adoptar sería el de aplicar dicha carga sobre una franja de entrepiso, de ancho $b=1,00$ m,; puesto el caso extremo de considerar el ancho total de un entrepiso verificaría para la casi totalidad de secciones, por más pequeñas que estas resulten, y en el otro extremo, aplicar la carga puntual de 1 kN sobre una sola tabla del panel, de manera individual, no sería representativo de la manera en la que realmente trabaja el panel (en conjunto, como un entrepiso macizo).

Tensiones transmitidas en los apoyos:

Por la manera en que se disponen las tablas en el panel, corresponde cumplir con el caso de tensiones de compresión perpendicular a la dirección de las fibras, $f_{c\perp}$, en base al Artículo 3.6.2; por lo que dicha tensión no debe exceder -en los apoyos- al valor de la tensión de diseño en compresión perpendicular a las fibras, ajustada, $F'_{c\perp}$.

$$f_{c\perp} \leq F'_{c\perp} = F_{c\perp} \times C_D \times C_M \times C_t \quad (8)$$

En este caso, para la determinación de la tensión $f_{c\perp}$ es necesario disponer del valor de la superficie de apoyo del panel; es decir, de las dimensiones del elemento sobre el que apoya el entrepiso.

Parámetros que intervienen en el diseño

De las ecuaciones anteriores, tenemos que las variables y los coeficientes que deben determinarse son las siguientes:

h: Altura de las tablas que conforman el panel de DLT, es decir, el espesor de este.

l : Luz de cálculo del entrepiso.

b : Acho del panel del entrepiso.

q : Cargas y combinación de cargas crítica, sobre el entrepiso.

F_b ; F_v ; $F_{c\perp}$: Tensiones de diseño de referencia, en flexión, en corte y en compresión perpendicular a las fibras, respectivamente.

E : Módulo de elasticidad de referencia del material.

$\rho_{0,05}$: Densidad de las tablas que conforman el panel.

C_D ; C_M ; C_t ; C_L ; C_F ; C_r : Factores de duración de la carga, de condición de servicio, de temperatura, de estabilidad lateral de la viga, de tamaño y de distribución lateral de las cargas, respectivamente.

K_{cr} : Factor de deformación dependiente del tiempo.

Proceso de diseño

Los parámetros anteriormente descriptos dependen de las condiciones de diseño que el profesional irá definiendo según el fin que otorgue al proyecto, y las condicionantes.

En un cálculo exacto, **el procedimiento es iterativo**, puesto que el peso propio de la estructura y su geometría (el valor de “ h ” especialmente) intervienen en prácticamente la totalidad del proceso. Esto puede ser rápida y fácilmente resuelto con el uso de simples herramientas de cálculo, como lo son las planillas de cálculo. En el caso de realizar un cálculo manual, deberá estimarse un peso propio de la estructura y con ella determinar la altura “ h ” necesaria de la sección transversal de las tablas, y luego verificar que se esté en buenas condiciones.

Para una mejor explicación y comprensión del proceso, se llevará a cabo el mismo mediante un ejemplo concreto:

Entre las primeras definiciones del proyecto, se determinarán las dimensiones en planta del entrepiso y el fin para el que se lo construirá. También el material a utilizar deberá ser definido en las primeras instancias de diseño, posiblemente condicionadas por la disponibilidad en el mercado, entre otras.

Supongamos, que el proyecto requiere que el entrepiso posea unas dimensiones tales que su ancho sea de 5,00 m. y su luz de cálculo* de 3,00 m., como se muestra en la Figura 9.

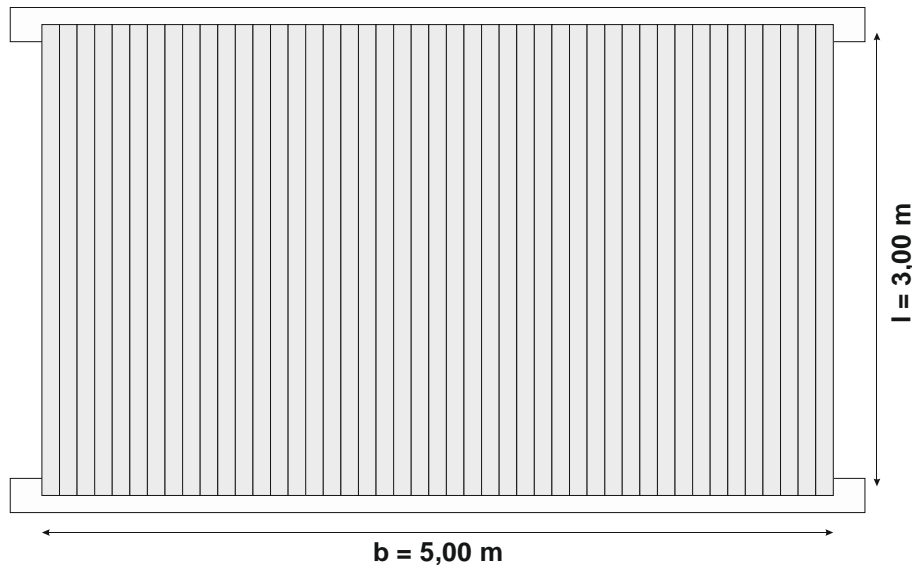


Figura 9: Vista en planta del entrepiso del ejemplo.

*La luz de cálculo se define como la distancia libre entre soportes más la mitad de la longitud de apoyo necesaria en cada extremo.

En este caso, se supone que la distancia entre caras internas de las vigas de apoyo es de $l_0 = 2,80 \text{ m}$. Ambas vigas poseen las mismas dimensiones, con un ancho de $b_0 = 0,20 \text{ m}$, y la longitud de apoyo del entrepiso es de $b_0/2 = 0,10 \text{ m}$ en cada extremo. Entonces, la luz de cálculo resulta:

$$l = l_0 + 2(b_0/2) = 2800 + 2 \times 100 \text{ mm} = \mathbf{3000 \text{ mm}} \quad (9)$$

En cuanto al espesor del panel, en este caso **se adoptará** un valor $d = 100 \text{ mm}$, como predimensionado, con el que se verificarán las disposiciones reglamentarias.

La madera del panel será de **pino elliotti, cultivado en el noreste de argentino; con clase de resistencia 1**, una de las especies madereras más cultivadas del país. Del Artículo S.1.1.3 del Suplemento del Reglamento CIRSOC 601-2016 obtenemos, para la madera seleccionada, los siguientes valores de tensiones de diseño y módulo de elasticidad de referencia:

De la Tabla S.1.1.3-1 del Suplemento del Reglamento, obtenemos:

$$F_b = 5,6 \text{ N/mm}^2 ; F_v = 0,6 \text{ N/mm}^2 ; F_{c\perp} = 0,9 \text{ N/mm}^2 ; E = 10300 \text{ N/mm}^2 \quad (10)$$

Además, de la Tabla S.1.1.3-2, obtenemos la densidad de la madera:

$$\rho_{0,05} = 420 \text{ kg/m}^3 \quad (11)$$

Los valores de los factores de ajustes se obtienen del Artículo 4.3:

Factor de duración de la carga, C_D : Adopta diferentes valores, los cuales están expresados en la **Tabla 4.3-2** del Reglamento. Cuando menor sea la duración de la carga, mayor es el valor del coeficiente.

En este ejemplo, el entrepiso estará destinado a oficinas, que es el principal uso al que apunta este trabajo (entrepisos en espacios internos, con ambientes secos), soportando cargas permanentes (q_D) y de sobrecarga de uso (q_L). Por lo tanto: Cargas permanentes: $C_D = 0,9$. Sobrecarga de uso: $C_D = 1,0$.

Debemos aclarar que los valores del factor C_D afectan a las tensiones de diseño de referencia en flexión como corte y en compresión, **para cada combinación de carga**, es decir, para cada una de las combinaciones se obtendrán diferentes tensiones de diseño ajustadas.

Factor de temperatura, C_t : Este coeficiente reduce la tensión de diseño a medida que el material se expone a mayores temperaturas. En este caso el ambiente es interior, con temperaturas $T \leq 40^\circ\text{C}$, 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:

$$C_F = \left(\frac{150 \text{ mm}}{h} \right)^{0,2} = \left(\frac{150 \text{ mm}}{100} \right)^{0,2} = 1,08 \leq 1,3 \quad (12)$$

Factor de distribución lateral de cargas, C_r : Todas las tablas del panel poseen las mismas dimensiones, por lo tanto, sus separaciones entre ejes son iguales, y se encuentran conectados lateralmente por medio de las espigas, entonces, $C_r = 1,10$.

Factor de condición de servicio, C_M : Las oficinas -destino de la construcción- constituyen un espacio interior, es decir, en **estado seco**, por lo cual el valor del factor de condición de servicio toma el valor $C_M = 1,00$

Factor de deformación dependiente del tiempo, K_{cr} :

Este factor, K_{cr} , (Artículo 3.2.3), utilizado para hallar las deformaciones diferidas, adopta valores que también dependen de las condiciones de servicio y de las condiciones en la que la estructura es cargada. Se toma el caso de vigas de madera aserradas cargadas en estado seco y con una condición de servicio de estado seco, con el que se tiene que el valor $K_{cr} = 1,5$.

Análisis de carga (q):

En cuanto al análisis de carga, como se mencionó anteriormente, los valores de las cargas permanentes, q_D , se determinan en función de la altura de las tablas "d", adoptada en el predimensionado (peso propio) más otros factores dependientes de cada diseño en particular; mientras que los valores de la sobrecarga de uso, q_L , se determinan en función del destino de la construcción (CIRSOC 101-2005).

Se realiza en análisis de carga, para un ancho de $b=1,00$ m.

Cargas permanentes:

Peso propio:

$$q_{D1} = \rho_{0,05} \times d \times g = 420 \text{ kg/m}^3 \times 0,10 \text{ m} \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 0,41 \text{ kN/m} \quad (13)$$

Contrapiso (H° simple; e=0,05 m):

$$q_{D2} = \rho_{H^\circ} \times e = 23 \text{ kN/m}^3 \times 0,05 \text{ m} = 1,15 \text{ kN/m} \quad (14)$$

Piso cerámico, 12 mm de espesor:

$$q_{D3} = 0,28 \text{ kN/m} \quad (15)$$

Carga permanente total:

$$q_D = q_{D1} + q_{D2} + q_{D3} = 1,84 \text{ kN/m} \quad (16)$$

Sobrecarga de uso - Destino oficinas:

$$q_L = 2,50 \text{ kN/m} \quad (17)$$

Combinación crítica de cargas (Artículo 1.4):

Como solamente actúan cargas gravitatorias (D) y de sobrecarga de uso (L), y además esta última es mayor a la primera, la única combinación de carga crítica, en base al Artículo 1.4 del CIRSOC 601-2016, es:

$$q = q_D + q_L = 1,84 \text{ kN/m} + 2,50 \text{ kN/m} = \mathbf{4,34 \text{ kN/m}} \quad (18)$$

Un ejemplo más completo de la determinación de la carga crítica en base a diferentes combinaciones de cargas puede hallarse en la bibliografía 5.

Finalmente, se tienen todas las variables y coeficientes que son necesarias para la verificación de las condiciones de diseño que el Reglamento CIRSOC 601-2016 exige, a saber:

$$h; b; l; q; F_b; F_v; F_{c\perp}; E; \rho_{0,05}; C_D; C_M; C_t; C_L; C_F; C_r; K_{cr}$$

Verificación de las condiciones de diseño

Estamos ahora en condiciones de verificar si se cumplen las exigencias presentadas en las ecuaciones (1) a (7).

1) Verificación en flexión:

Momento estático de la sección transversal unitaria (b=1,00 m.):

$$S = \frac{b h^2}{6} = \frac{100 \text{ cm} \times (10 \text{ cm})^2}{6} = 1666,66 \text{ cm}^3 \quad (19)$$

Momento flexor máximo:

$$M = \frac{q l^2}{8} = \frac{4,34 \text{ kN/m} \times (3 \text{ m})^2}{8} = 4,88 \text{ kNm} \quad (19)$$

Máxima tensión originada por el momento flector:

$$f_b = \frac{M}{S} = \frac{4,882 \text{ kNm}}{1666,67 \text{ cm}^3} \times \frac{100^3 \text{ cm}^3}{1^3 \text{ m}^3} = 2,93 \text{ N/mm}^2 \quad (20)$$

Tensión de diseño en flexión ajustada:

$$F'_b = F_b \times C_D \times C_M \times C_t \times C_L \times C_F \times C_r = 5,6 \text{ N/mm}^2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1,08 \times 1,10$$

$$F'_b = 6,65 \text{ N/mm}^2 \quad (21)$$

Se verifica la condición de diseño en flexión ($f_b \leq F'_b$).

2) Verificación en corte:

Esfuerzo de corte máximo:

$$V = \frac{q l}{2} = \frac{4,34 \text{ kN/m} \times 3 \text{ m}}{2} = 6,51 \text{ kN} \quad (22)$$

Máxima tensión originada por el esfuerzo de corte:

$$f_v = \frac{3 V}{2 b d} = \frac{3 \times 6510 \text{ N}}{2 \times 1000 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}} = 0,097 \text{ N/mm}^2 \quad (23)$$

Tensión de diseño en flexión ajustada:

$$F'_v = F_v \times C_D \times C_M \times C_t = 0,6 \text{ N/mm}^2 \times 1 \times 1 \times 1 = 0,6 \text{ N/mm}^2 \quad (24)$$

Se verifica la condición de diseño en corte ($f_v \leq F'_v$).

3) Control de las deformaciones:

Momento de inercia de la sección transversal:

$$I = \frac{b h^3}{12} = \frac{100 \text{ cm} \times 10^3 \text{ cm}^3}{12} = 8.333,33 \text{ mm}^4 \quad (25)$$

Módulo de elasticidad ajustado:

$$E' = E \times C_M \times C_t = 10300 \text{ N/mm}^2 \times 1 \times 1 = 10300 \text{ N/mm}^2 \quad (26)$$

Deformaciones iniciales:

La deformación inicial para las cargas variables es, en este caso, para la sobrecarga

de uso (L), y resulta:

$$\Delta_{i(V)} = \Delta_{iL} = \frac{5 q_L l^4}{384 E' I} = \frac{5 \times 2,5 \text{ kN/m} \times 300^4 \text{ cm}^4}{384 \times (10,3 \text{ kN/mm}^2) \times 8333,33 \text{ cm}^4} = 3,07 \text{ mm} \quad (28)$$

La deformación inicial admisible, para el caso de oficinas, es:

$$\Delta_{i \text{ adm}} = l/360 = 3000 \text{ mm}/360 = 8,33 \text{ mm} \quad (29)$$

Por lo que se verifica la condición $\Delta_{i(V)} \leq \Delta_{i \text{ adm}}$.

Deformaciones finales:

En este caso solo actúan las cargas D y L, y ambas se consideran como “cargas de larga duración” (cargas LD), por lo que el término “ $\Delta_{i(CD)}$ ” en la ecuación (4) es nulo por la no existencia de cargas de corta duración (cargas CD), y en consecuencia dicha expresión se simplifica.

Por lo dicho anteriormente, la deformación final de la totalidad de las cargas resulta:

$$\Delta_{f(TC)} = K_{cr} \cdot \Delta_{i(LD)} = 1,5 \cdot \frac{5 \times 4,34 \text{ kN/m} \times 300^4 \text{ cm}^4}{384 \times (10,3 \text{ kN/mm}^2) \times 8333,33 \text{ cm}^4} = 8,00 \text{ mm} \quad (30)$$

La deformación diferida admisible, para el caso de oficinas, es:

$$\Delta_{f \text{ adm}} = l/300 = 3000 \text{ mm}/360 = 10 \text{ mm} \quad (31)$$

Verificándose lo requerido: $\Delta_{f(TC)} \leq \Delta_{f \text{ adm}}$.

4) Control de las vibraciones inducidas por el tránsito humano:

Para determinar la frecuencia natural de vibración de la estructura se empleará la masa de la carga permanente más la mitad de la sobrecarga de uso, como se recomienda en la bibliografía 5. Por lo tanto:

$$q_{ua} = q_D + 0,5 q_L = 1,84 \text{ kN/m}^2 + 0,5 \times 2,5 \text{ kN/m}^2 = 3,09 \text{ kN/m}^2 \quad (32)$$

La masa de esta carga, por unidad de área resulta:

$$m_{ua} = \frac{3,09 \text{ kN}}{\text{m}^2} \times \frac{1000 \text{ N}}{1 \text{ kN} \times 9,8 \text{ m/s}^2} = 315 \text{ kg/m}^2 \quad (33)$$

Por lo que podemos determinar la frecuencia natural de vibración:

$$\sqrt{\frac{E' I}{m_{ua}}} = \sqrt{\frac{10300 \text{ N} \cdot 0,00008333 \text{ m}^4 \cdot 1000^2 \text{ mm}^2}{315 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 1^2 \text{ m}^2}} = \sqrt{2.724,86 \text{ m}^4/\text{s}^2} \quad (34)$$

$$f_0 = \frac{\pi}{2 l^2} \sqrt{\frac{E' I}{m_{ua}}} = \frac{\pi}{2 \cdot 3^2 \text{ m}^2} \sqrt{2.724,86 \text{ m}^4/\text{s}^2} = 9,11 \text{ Hz} \quad (35)$$

Se cumple entonces lo exigido en la ecuación (6), $f_0 \geq 8 \text{ Hz}$.

La deformación instantánea para una carga puntual de 1 kN resulta:

$$\Delta_{i(1kN)} = \frac{1 \text{ kN } l^3}{48 E' I} = \frac{1 \text{ kN} \times 300^3 \text{ cm}^3}{48 \times (10,3 \text{ kN/mm}^2) \times 8333,33 \text{ cm}^4} \times \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} = 0,65 \text{ mm} \quad (36)$$

La deformación admisible es:

$$\frac{7,5}{l_{[m]}^{1,2}} = \frac{7,5}{3^{1,2}} \text{ mm} = 2 \text{ mm} \leq 1,5 \text{ mm} \quad (37)$$

Se verifica la exigencia reglamentaria, $\Delta_{i(1kN)} \leq 1,5 \text{ mm}$.

5) Tensiones transmitidas en los apoyos:

La tensión de compresión perpendicular a las fibras, en los apoyos, se toma como el valor de la reacción del panel (en este caso coincidente con el esfuerzo de corte máximo), distribuido uniformemente en el área de contacto entre el entrepiso y la viga sobre la que apoya:

$$f_{c\perp} = \frac{V_{max}}{b \times (b_0/2)} = \frac{6,51 \text{ kN}}{1000 \times 100 \text{ mm}^2} = 0,065 \times 10^{-3} \text{ kN/mm}^2 \quad (38)$$

La tensión de diseño en compresión perpendicular a las fibras, ajustada es:

$$F'_{c\perp} = F_{c\perp} \times C_D \times C_M \times C_t = 0,9 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \times 1 \times 1 \times 1 = 0,9 \text{ kN/mm}^2 \quad (39)$$

Se verifica la última condición expuesta, $f'_{c\perp} \leq F'_{c\perp}$.

Se verifican así, las condiciones de resistencias y deformaciones que el CIRSOC 601-2016 exige para estas estructuras.

DISPOSICIONES DE LAS ESPIGAS

Un último parámetro que nos definirá la altura de las tablas a utilizar, en un panel

DLT, será la disposición geométrica de las espigas (Figura 10).

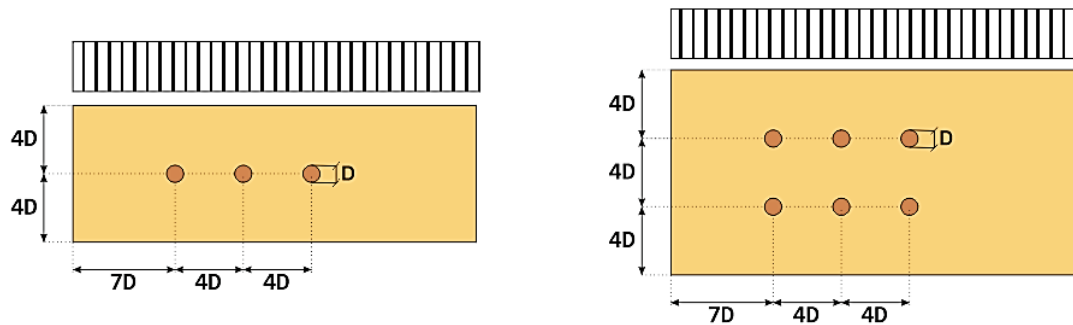


Figura 10: Geometría de las uniones con espigas

En este trabajo solo se brindarán recomendaciones en base a la Tabla 8.2-1 del CIRSOC 601-2016. Como las tensiones se producen de manera radial, es decir (Figura 5), se considerarán conservativamente todos los bordes como “cargados”, por lo que se debe cumplir lo siguiente:

- Distancia al borde cargado, en dirección perpendicular a las fibras: 4 diámetros.
- Distancia al extremo cargado, en dirección paralela a las fibras: 7 diámetros.
- Distancia entre filas: 4 diámetros.

Las distancias se cuentan desde el centro de la perforación.

En la siguiente tabla se dan los espesores mínimos para un entrepiso de panel DLT, en función del diámetro de las espigas y de la cantidad de filas a emplear.

Diámetro de la espiga	Nº de filas	Espesor “ h_{min} ” del panel DLT
12 mm ó ½”	1 fila	96 mm ó 4”
	2 filas	144 mm ó 6”
19 mm ó ¾”	1 fila	152 mm ó 6”
	2 filas	228 mm ó 9”
25 mm ó 1”	1 fila	200 mm ó 8”
	2 filas	300 mm ó 12”
X	1 fila	8 X
	2 filas	12 X

Tabla 2: Espesor mínimo “h” de un panel de DLT utilizado como entrepiso.

Para nuestro ejemplo anterior, donde se adoptó una altura $h=100$ mm, corresponde adoptar una fila de espigas de 12mm de diámetro.

De esta manera, se verifican todas las condiciones de diseño que el Reglamento CIRSOC 601-2016 exige para para un entrepiso de DLT, y queda concluido el diseño.

PROPUESTA DE GUÍA DE DISEÑO: Tabla de Dimensionamiento

Luego del desarrollado de la metodología de diseño, se presenta a continuación el diseño de una tabla de dimensionamiento para estas estructuras, de manera tal que implícitamente incluyan las prescripciones del CIRSOC 601-2016.

Se puede confeccionar una planilla, donde, por ejemplo, ingresando solo con los valores de carga crítica “ q ” y luz de cálculo “ l ” -como sucede habitualmente en el dimensionado de viguetas de hormigón-, se puedan determinar la escuadría de tablas a utilizar en la fabricación del panel ($b \times h$).

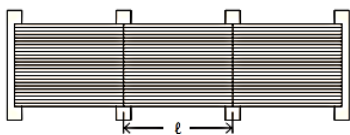
Para ello, la Tabla deberá diferenciar la especie maderera, lo que define las propiedades mecánicas y densidad del material (F_b ; F_v ; $F_{c\perp}$; E ; $\rho_{0,05}$). Debería indicarse también para que tipos de cargas (D, L, W, S, etc.) fue diseñado el panel, lo que implicaría definir el valor adoptado para el factor de duración de la carga, C_D .

Para los paneles de DLT, el factor de estabilidad lateral de la viga siempre será igual a la unidad, $C_L = 1,00$; y el factor de distribución lateral de cargas también tendrá definido su valor, $C_r = 1,10$,

Para cada altura “ h ” dada, se define perfectamente el valor del factor de forma, C_F .

Finalmente, debería indicar a que temperatura puede ser expuesto el panel (C_t), y a qué tipo de ambiente de manera que esto defina el valor de los coeficientes C_M y K_{cr} .

Una Tabla como la propuesta mencionada, luciría como se muestra a continuación:

ENTREPISO DE DLT – MADERA LAMINADA CON ESPIGAS								
PANEL NECESARIO: SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS TABLAS ($b \times h$)								
ESQUEMA ESTRUCTURAL: Vano simple					ESPECIE: Pino Elliotis			
					RESISTENCIA: Grado 2			
					Luz de cálculo “ l ” (m)			
Carga de diseño “ q ” (kN/m ²)	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
2,00	$b \times h_1$	$b \times h_1$	$b \times h_1$	$b \times h_1$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_3$
2,25	$b \times h_1$	$b \times h_1$	$b \times h_1$	$b \times h_1$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_3$
2,50	$b \times h_1$	$b \times h_1$	$b \times h_1$	$b \times h_1$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_3$

2,75	$b \times h_1$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_3$
3,00	$b \times h_1$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$
3,25	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$
3,50	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_4$
3,75	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_4$
4,00	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_2$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_4$
4,25	$b \times h_2$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_4$	$b \times h_4$
4,50	$b \times h_2$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_4$	$b \times h_4$
4,75	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_4$	$b \times h_4$	$b \times h_4$
5,00	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_3$	$b \times h_4$	$b \times h_4$	$b \times h_4$

Para su uso en interiores (ambiente seco)

Tabla 3. Propuesta de tabla de dimensionamiento de entresijos de DLT

CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha aplicado el Reglamento CIRSOC 601-2016 al diseño de entresijos materializados con paneles de DLT (madera laminada con espigas); un novedoso sistema constructivo de paneles perteneciente a la familia de *Mass Timber* (madera maciza), y construido completamente en madera, sin el uso de pegamentos ni clavos. Su diseño estructural implica la verificación de las tensiones admisibles (flexión, corte, y compresión perpendicular a las fibras en los apoyos); además de las verificaciones de las condiciones de funcionalidad y estética (deformaciones y vibraciones). Este tipo de estructuras no está expuesto a un posible pandeo lateral.

Hemos observado que este proceso no presenta mayores dificultades en cuanto a las ecuaciones que se emplean, puesto que básicamente consiste en el diseño de piezas en condición de flexión recta. Los parámetros y las variables intervinientes pueden ser fácilmente identificadas a partir de la definición de pocas condiciones de diseño (geometría y destino de la edificación, especie maderera, etc.), las cuales quedan a criterio del proyectista y en función del destino de la construcción.

Sin embargo, debemos mencionar que las condiciones de servicio (estado seco o húmedo) son uno de los factores que más influyen en el diseño, tanto en el contenido de humedad del panel como en la adopción de los valores de varios coeficientes. Por ello, las propiedades del material relacionadas al contenido de humedad y su variación ser determinadas fehacientemente para las especies madereras comercializadas en el país. Así mismo, los paneles deben estar protegidos de variaciones bruscas de humedad durante todas las etapas, desde su fabricación hasta el montaje en obra.

Resulta necesario un análisis de las tensiones producidas por la expansión de las espigas y sus efectos -que estarán en función de la diferencia en el % de humedad entre las tablas y las espigas- de manera tal de verificar las separaciones mínimas recomendadas, y establecer también una separación máxima y una cantidad mínima de espigas.

La abundancia de maderas comercializables en nuestro país, un diseño estructural poco complejo y la facilidad de prefabricación, sumados a su gran flexibilidad arquitectónica, convierten a los paneles de madera laminada con espigas en una opción viable para su uso masivo como estructura en entresijos y techos en viviendas, oficinas y apartamentos, como actualmente lo son las viguetas de hormigón pretensado; pero con las ventajas que posee la madera: menor consumo energético en su fabricación, renovable, de reducido peso propio, buena aislación térmica y acústica, y amigable con el medioambiente por ser el único material con una huella de carbón negativa debido a que extrae y almacena dióxido de carbono del aire.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al ing. Matias Gabriel Morel, quien ha prestado su desinteresada colaboración en la revisión integral del trabajo, y especialmente en la confección del ejemplo numérico.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARGÜELLES ÁLVAREZ, R; Arriaga Martitegui, F.; Herrero, M.E.; Gonzalez, G. I.; Argüelles Bustillo, R. (2013). Estructuras de Madera – Bases de Cálculo. AITIM – Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera. Madrid, España.
2. 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.
3. BSLC (2017). Nail-Laminated Timber: U.S. Design & Construction Guide v1.0. Binational Softwood Lumber Council, British Columbia, Canada.
4. INTI-CIRSOC (2018). Guía para el Proyecto de Estructuras de Madera con Bajo Compromiso Estructural en Base al Reglamento CIRSOC 601-2016, Parte Primera: Viviendas de Madera de Una Planta. Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
5. INTI-CIRSOC (2016). Manual de Aplicación de los Criterios de Diseño Adoptados en el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
6. INTI-CIRSOC (2016). Reglamento Argentino de Estructuras de Madera, CIRSOC 601-2016. Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
7. INTI-CIRSOC (2005). Reglamento Argentino de Cargas Permanentes y Sobrecargas Mínimas de Diseño para Edificios y Otras Estructuras, CIRSOC 101-2005. Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
8. 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.
9. STRUCTURECRAFT (2017). Mass Timber Design Guide: Dowel Laminated Timber, The All Wood Panel. StructureCraft Builders Inc., British Columbia, Canada.
10. STRUCTURECRAFT (2017). Dowel Laminated Timber: Profile Handbook. StructureCraft Builders Inc., British Columbia, Canada.