

CARACTERIZACIÓN DE PANELES DE MADERA CONTRALAMINADA (CLT) FABRICADOS A PARTIR DE TABLAS DE *PINUS TAEDA/ELLIOTTII* DE BAJAS PROPIEDADES MECÁNICAS

CHARACTERIZATION OF CROSS LAMINATED TIMBER MADE FROM WOOD OF LOW-MECHANICAL PROPERTIES OF *PINUS TAEDA/ELLIOTTII*

D. Godoy ⁽¹⁾ (P), A. Vega ⁽²⁾, V. Baño ⁽³⁾

(1) Msc. Arq. Daniel Godoy, IEM, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

(2) Dr. Abel Vega, IET, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

(3) Dra. Vanesa Baño, IET, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Dirección de contacto: dgodoy@fing.edu.uy; (P) Presentador

Código de identificación: T4-06

Resumen

Actualmente en Uruguay existe un excedente de madera de pino que no tiene destino comercial, siendo de interés nacional fomentar inversiones que promuevan la diversificación productiva para los derivados de la madera. El empleo de paneles de madera contralaminada para la construcción de edificaciones se presenta como una oportunidad ya que permitiría la utilización de un importante volumen de madera. Además, fomentaría su utilización en el mercado de la construcción, actualmente escasa debido, principalmente, al desconocimiento del comportamiento de la madera por parte de los arquitectos e ingenieros. En la actualidad los paneles de madera contralaminada no se fabrican comercialmente en Uruguay. A partir de tablas de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* obtenidas de raleos forestales cuyas propiedades mecánicas son bajas ($E_{0,m}=7155 \text{ N/mm}^2$ y $f_{m,k}=9.1 \text{ N/mm}^2$) se fabricaron 5 paneles de madera contralaminada. Se configuraron en 3 capas, de dimensiones de 102x381x3000 mm y encolados con adhesivo estructural de Emulsión Polímero Isocianato. Se presentan los resultados experimentales para la caracterización en flexión de los paneles según los requerimientos de la norma EN 16351. En base a los resultados obtenidos, se proporciona una primera aproximación a la caracterización de los paneles fabricados con esta madera, comparando resultados de ensayos obtenidos a partir de las tablas que conforman los paneles con resultados de ensayos de panel.

Palabras clave: madera contralaminada; CLT; *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*; bajas propiedades mecánicas; raleos

Abstract

*In Uruguay there is a surplus of pine wood; which has not industrial destiny. Government has interest in foment investments that promote the development of wood-based products. The use of cross-laminated timber (CLT) in building is presented as an opportunity of development of wood-engineered products, which would consume a high volume of wood. In addition, knowing the structural behaviour of these products, the building market could be increased. Currently, cross laminated timber is not commercially produced in Uruguay. From sawn timber of *P. elliottii* and *P. taeda* from thinnings, with low mechanical properties $E_{0,m}=7155 \text{ N/mm}^2$ y $f_{m,k}=9.1 \text{ N/mm}^2$, five CLT panels of three layers were manufactured. Their dimensions were 102x381x3000 mm and they were glued using EPI adhesive. Experimental results of the layers and the CLT panels show a first characterization of CLT panels of Uruguayan pine from thinnings.*

Keywords: cross-laminated timber; *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*; low mechanical properties

1. INTRODUCCIÓN

La forestación en Uruguay no tuvo un desarrollo significativo hasta la década de 1990 donde, gracias a exoneraciones fiscales, se plantaron unas 800.000 hectáreas, principalmente de las especies *Pinus taeda* y *elliottii* y *Eucalyptus grandis*. El eucalipto tiene en la industria de la celulosa un demandante sólido que asegura la colocación de buena parte de la producción. El caso del pino es diferente. Para el período 2010-2030 se estima una oferta anual promedio de 2,9 millones de metros cúbicos de madera de pino, de los cuales 1,4 millones de metros cúbicos corresponden a madera de raleos. De la madera pino disponible en el país, un total de 1,7 millones de metros cúbicos de trozas no tienen en la actualidad destino industrial [1]. La madera procedente de primeros raleos ni siquiera es retirada del monte debido a que los costos de extracción no compensan el aprovechamiento de la misma (Figura 1). Esto genera preocupación en diversos actores de la cadena de producción. El Plan de Acción Integral del Consejo Sectorial Forestal-Madera tiene como primer objetivo “fomentar inversiones que promuevan la producción de derivados de la madera con mayor valor agregado y que profundicen la diversificación productiva” [2]. La disponibilidad de madera de pino para transformación mecánica lleva a que empresas del sector de primera y segunda transformación estén interesadas en proporcionarle un valor agregado a esta especie, siendo uno de los posibles destinos el sector de la construcción.



Figura 1: Madera de primeros raleos sin aprovechamiento forestal

En Uruguay, históricamente las construcciones con madera son meramente testimoniales en el volumen total construido. Una de las probables razones se debía a falta de la materia prima nacional en cantidades abundantes y de bajo costo. En estas construcciones se utilizaron, principalmente, maderas de frondosas importadas, con elevadas propiedades mecánicas y alta durabilidad natural, las cuales sólo eran usadas en construcciones de calidad media o superior.

La falta de materia prima nacional está superada, siendo otros los desafíos que se presentan para su uso en construcción. Uno de ellos pasa por el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de la madera procedente de plantaciones nacionales para el diseño y el cálculo estructural. En relación a este punto, actualmente se está trabajando en la caracterización estructural de estas especies. Según estudios realizados, la madera de *P. elliottii/taeda* de edades comprendidas entre los 15 y los 25 años, alcanzaría propiedades mecánicas correspondientes a una clase resistente C14 de la norma europea EN 338 [3], [4,5].

En base a estos antecedentes se considera una oportunidad, para la industria de madera aserrada uruguaya, el desarrollo de productos de ingeniería de madera de estas especies. En concreto, el presente trabajo se centra en el desarrollo de paneles de madera contralaminada de madera de pino proveniente de raleos.

Los paneles CLT son un desarrollo originalmente europeo, mercado en el cual ya es un producto consolidado. Los productores han avalado sus paneles mediante Documentos de Idoneidad Técnica

(European Technical Approval, ETA) y marcado CE, que les permiten operar en el mercado de la madera estructural. En el año 2016 entró en vigencia la norma EN 16351 [6] sobre requerimientos de fabricación y control de calidad de la madera contralaminada.

En una segunda instancia de expansión, los paneles CLT se comenzaron a producir en Canadá y Estados Unidos, siendo en esos países productos validados estructuralmente por la norma ANSI/APA PRG 320-2012 [7]. La misma no es de cumplimiento obligatorio, pero establece valores recomendados que deben cumplir los paneles de madera contralaminada.

En Sudamérica son pocas las empresas que fabrican CLT, una en Chile y otra en Brasil, que operan el mercado sin certificación para uso estructural. En Uruguay no se fabrican estos paneles ni existen en la actualidad edificaciones construidas con madera contralaminada. Particularmente, con respecto a la fabricación de CLT en base a madera de *Pinus elliottii* y *P. taeda* no existen antecedentes a nivel mundial, lo cual exige la realización de ensayos experimentales para la estimación de las propiedades mecánicas, tanto de la madera aserrada empleada, como de los paneles fabricados con estas especies.

El uso de madera de propiedades mecánicas bajas está siendo foco de investigaciones en diferentes países, como los de Smith (2015) [8] en Inglaterra a partir del uso de madera de picea de procedencia local, y de Marko et al. (2016) [9] en Hungría, a partir del uso de madera de álamo.

El objetivo del presente trabajo es, por lo tanto, tener una primera idea sobre la caracterización de los paneles CLT fabricados en Uruguay con madera de *P. elliottii/taeda* procedente de raleos. Para ello se relacionan los valores de las propiedades mecánicas obtenidos de los ensayos experimentales de flexión de los paneles CLT y de las tablas de madera aserrada que los componen.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Madera utilizada en las láminas

Las tablas de madera utilizadas para la fabricación de los paneles CLT procedían de raleos forestales de las especies *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*, las cuales no se diferencian comercialmente en Uruguay. Sus dimensiones fueron de 34x127x3000 mm y se seleccionaron de modo que ninguna tabla alcanzó la clase visual estructural para madera de coníferas uruguaya denominada “EC7” [5]. Esto es, madera con propiedades mecánicas menores a 7.04 kN/mm² de módulo de elasticidad longitudinal medio y a 14.6 N/mm² de resistencia característica a flexión.

Se fabricaron 5 paneles CLT, configurados en 3 capas, de dimensiones 102x381x3000 mm, encolados con adhesivo estructural de Emulsión Polímero Isocianato (EPI). Para ello se basó, en lo posible, en las recomendaciones de la norma EN 16351, (Figura 2). La aplicación del adhesivo se realizó de forma manual, aplicando una cantidad promedio de 200 gr/m². Debido a que no existe una industria productora de CLT en Uruguay, el prensado se realizó en una prensa hidráulica, utilizada normalmente para la fabricación de paneles enchapados y puertas, cuyas dimensiones máximas operativas son de 1.30x3.50 metros. La presión utilizada fue de 100 kg/cm² para la conformación del panel.

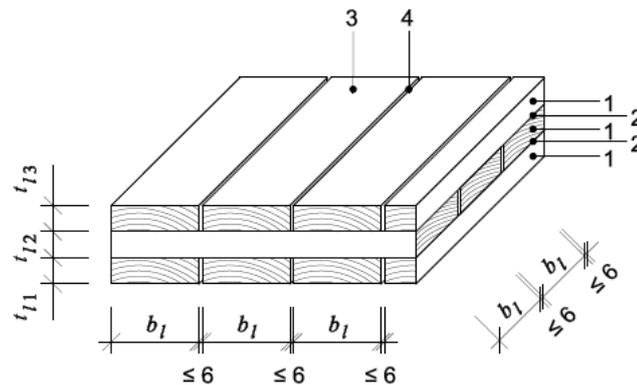


Figura 2: Proceso de fabricación de los paneles CLT

2.2 Geometría de los paneles

Los paneles fueron configurados en 3 capas, partiendo de tablas de 34x127x3000 mm al momento del encolado, cepilladas previamente (figura 3). Para la conformación del panel las tablas no fueron encoladas en sus cantos. Dado que se utilizaron tablas de madera sin uniones finger joint, según la denominación empleada por la EN 16531, las tablas coinciden con las láminas.

(medidas en mm)



Siendo:

- 1 capa de madera
- 2 línea de encolado entre las capas
- 3 lamina
- 4 holgura entre las láminas
- b_l anchura de la lámina acabada, 127 mm
- t_l grosor de la lámina acabada, 34 mm

Figura 3: Configuración de los paneles CLT

2.3 Determinación de propiedades de resistencia y rigidez de la madera contralaminada

La norma EN 16351 establece que las propiedades mecánicas del panel deben obtenerse por alguno de los dos siguientes métodos: i) según la determinación de las propiedades de las capas y ii) según ensayos de madera contralaminada. Se presenta a continuación la metodología empleada en cada uno de los dos métodos para la estimación de sus propiedades mecánicas.

2.3.1 Según la determinación de las propiedades de las capas

Para determinar las propiedades de las capas se ensayaron 40 tablas a flexión de cuatro puntos según la norma EN 408 [10] (figura 4) y se calcularon los valores característicos de resistencia y rigidez según la EN 384 [11], ajustando los valores a un contenido de humedad de 12% y sin aplicar el factor de altura en la corrección de los valores, según indicaciones de la EN 16351. Dichas tablas fueron previamente clasificadas visualmente de modo que ninguna cumplía con la clase visual EC7, asimilable a una clase resistente C14, tal y como se comentó anteriormente. Estos valores fueron los considerados para todas las tablas que constituyen los paneles de madera contralaminada.



Figura 4: Ensayo a flexión en piezas de madera aserrada

Las densidades media y característica de los paneles fueron calculadas según las ecuaciones (1) y (2) definidas en la citada norma.

$$\rho_{\text{panel, media}} = \rho_{\text{capa, media}} \quad (1)$$

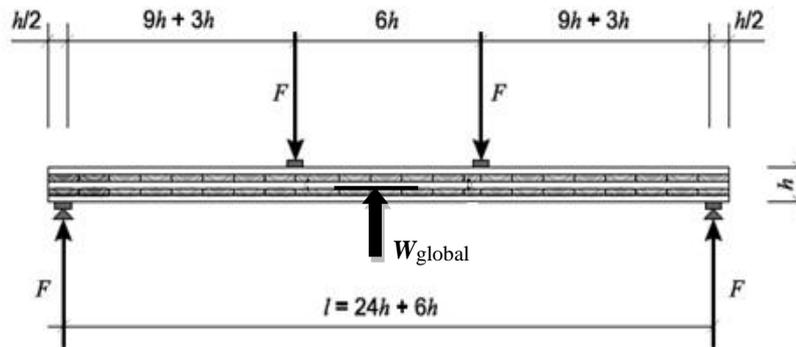
$$\rho_{\text{panel, k}} = 1,1 \rho_{\text{capa, k}} \quad (2)$$

Donde, $\rho_{\text{capa, media}}$ es la densidad de la peor calidad de madera de una capa de madera contralaminada, y $\rho_{\text{capa, k}}$ es densidad característica de la menor calidad de madera de una capa de madera contralaminada.

2.3.2 Según ensayos de madera contralaminada

Se realizaron ensayos experimentales para la caracterización en flexión de los paneles según los requerimientos del anexo F de la norma EN 16351. Se ensayaron 5 paneles de madera contralaminada de 3 capas, de 381 mm de anchura y espesor total 102 mm, con un contenido de humedad medio de 15% al momento del ensayo.

Dado que $b_l/t_l < 4$, la configuración del ensayo se corresponde con las figuras 5 y 6, para disminuir la incidencia del fallo por cortante de rodadura. La luz utilizada fue de $28h$, equivalente a 2.86 metros.



Siendo:

h altura de la probeta

l luz de la probeta

W_{global} flecha medida en la línea media

Figura 5: Esquema de ensayo a flexión en paneles CLT



Figura 6: Ensayo a flexión en paneles CLT de pino uruguayo

El cálculo de las propiedades de flexión se basaron en la teoría de viga de Euler/Timoshenko, asumiendo que $E_0 = E_{0,1,medio}$ y que $E_{90} = 0$ [12]. Se estimó que el módulo de elasticidad de todas las tablas que configuraban los 5 paneles era el mismo y coincidente con los resultados obtenidos de los ensayos experimentales de las tablas de madera aserrada. La rigidez en flexión de los paneles CLT (K_{CLT}) se calculó según la ecuación 3, de acuerdo a la Figura 7.

$$K_{CLT} = \sum(E_i I_i) + \sum(E_i A_i e_i^2) \quad (3)$$

donde,

E_i es el módulo de elasticidad de cada capa i

I_i es el momento de inercia de la capa i en referencia a su eje neutro

A_i es el área de la capa i ($A_i = b_{CLT} t_{l,i}$)

e_i es la distancia entre el centro de gravedad S_i de la capa i y el centro de gravedad S del panel

El momento de inercia del panel se calculó de acuerdo al Teorema de Steiner según la ecuación 4.

$$I_i = \frac{b_{CLT} t_i^3}{12} + b_{CLT} t_i^3 e^i \quad (4)$$

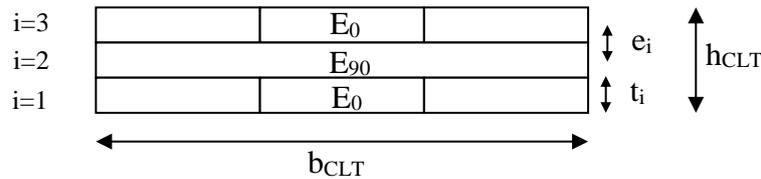


Figura 7: Esquema de los parámetros involucrados en el cálculo de rigidez de flexión
Partiendo de la ecuación 5 de tensión a flexión,

$$\sigma = \frac{M y}{I} \quad (5)$$

donde,

M es el momento flector ($M = \frac{P a_1}{l}$)

y es el brazo flector ($y = e + \frac{t}{2}$; $y = \frac{h}{2}$)

I es el momento de inercia

y la rigidez en flexión K es igual a $\sum E I$,

la resistencia a flexión del panel CLT ($f_{m,CLT}$) se calculó de acuerdo a la ecuación 6

$$f_{m,CLT} = \frac{F_{max} a_1}{K_{CLT}} z E_{0(z)} \quad (6)$$

donde,

F_{max} es la máxima carga a la que se produjo la rotura del panel

a_1 es la distancia entre el apoyo y el punto de aplicación de la carga

K_{CLT} es la rigidez en flexión (Ecuación 3)

z es la distancia entre el borde y el centro de gravedad del panel

$E_{0(z)}$ es el módulo de elasticidad de la capa referida

El módulo de elasticidad global se calculó según la ecuación (7), considerando el momento de inercia (I) calculado según el método de Steiner definido anteriormente.

$$E_{m,g} = \frac{3a_1 l^2 - 4a^3}{24I(2\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1})} \quad (7)$$

donde,

$F_2 - F_1$ es la diferencia de carga aplicada a $0,1 F_{max}$ y $0,4 F_{max}$ del ensayo experimental de flexión de cuatro puntos

$w_2 - w_1$ es la diferencia de deformación medida experimentalmente y correspondiente a las cargas F_2 y F_1 , respectivamente

El módulo de elasticidad local según la ecuación (8), considerando el momento de inercia eficaz ($I_{0,ef}$) calculado según el método Gamma, de acuerdo al manual de proHolz para el diseño estructural de CLT [13], basado, a su vez, en el Anexo B del Eurocódigo 5 [14]. Dicho momento de inercia tiene en cuenta, en su cálculo, el valor de módulo de cortante (G) que, debido a la falta de resultados experimentales en esta fase de desarrollo del proyecto, se consideró un valor de $G=50N/mm^2$.

$$E_{m,l} = \frac{3al^2 - 4a^3}{24I_{0,ef} \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1}\right)} \quad (8)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Según la determinación de las propiedades de las capas

En la tabla 1 se muestran los resultados de resistencia a flexión y de rigidez obtenidos en las tablas a partir de los ensayos.

Tabla 1: Valor medio (f_m) y quinto percentil (f_{05}) de la resistencia a flexión, módulo de elasticidad ($E_{m,g_{12}}$) y densidad media (ρ_{12}) y característica ($\rho_{k_{12}}$) de las tablas de madera aserrada de *P.elliottii/taeda* corregidas al 12% de contenido de humedad

n	f_m (N/mm ²)	f_{05} (N/mm ²)	$E_{m,g_{12}}$ (N/mm ²)	ρ_{12} (Kg/m ³)	$\rho_{k_{12}}$ (Kg/m ³)
40	25,1	9,08	7.155	439	364

En una comparativa de las propiedades mecánicas de la madera aserrada utilizada en la fabricación de los paneles CLT, se constata que no alcanza los valores de ninguna de las clases resistentes propuesta por la norma EN 338 [15] por su baja resistencia a flexión.

Se presenta en la Tabla 2 los valores de densidad media y característica de los cinco paneles de madera contralaminada fabricados, obtenidos a partir de las densidades de las capas que los conforman. Se observa que las densidades características de los paneles superan los valores característicos de la muestra de madera aserrada ensayada (Tabla 1).

Tabla 2: Valores de densidad media y característica de los paneles

Densidad media y característica (Kg/m ³)						
panel	capa	tablas	$\rho_{capa, media}$	$\rho_{capa, k}$	$\rho_{panel, media}$	$\rho_{panel, k}$
1	1 ^a	3	436	409	436	413
	2 ^a	24	437	375		
	3 ^a	3	450	428		
2	1 ^a	3	475	438	445	426
	2 ^a	24	445	387		
	3 ^a	3	471	406		
3	1 ^a	3	448	440	440	426
	2 ^a	24	440	387		
	3 ^a	3	470	452		
4	1 ^a	3	454	434	406	421
	2 ^a	24	448	383		
	3 ^a	3	406	397		
5	1 ^a	3	431	428	431	440
	2 ^a	24	469	400		
	3 ^a	3	440	430		

3.2 Según ensayos en los paneles CLT

En la tabla 3 se presentan los valores de carga máxima, resistencia a flexión y módulos de elasticidad global y local de los 5 paneles CLT ensayados.

Tabla 3: Resultados de ensayos a flexión de los paneles CLT

Panel	F_{max} (kN)	$f_{m,CLT}$ (N/mm ²)	$E_{0,g}$ (N/mm ²)	$E_{0,l}$ (N/mm ²)
1	28.0	25	6714	7328
2	30.0	27	6105	6663
3	21.8	20	4482	4892
4	19.3	17	6726	7341
5	23.0	21	9397	10256
Promedio	24.4	22	6685	7296

Los resultados de resistencia a flexión media obtenida de los ensayos experimentales de flexión de los paneles CLT presentaron valores un 12% menor que los valores de resistencia a flexión media de la madera aserrada de partida. En un análisis de los resultados individuales de cada panel, los paneles 1 y 2 mostraron valores de resistencia a flexión mayores que los declarados en las tablas aserradas, mientras que los paneles 3, 4 y 5 mostraron valores ligeramente menores. El valor de módulo de elasticidad global promedio de los 5 paneles CLT fue ligeramente menor que el correspondiente a las tablas de madera aserrada de partida.

En base a estos resultados se estima oportuno, en trabajos futuros, estimar los valores de cada tabla que compone el panel CLT o, en su defecto, el valor medio de cada capa.

4. CONCLUSIONES

Se considera que el uso de madera de pino uruguayo proveniente de raleos para la producción de paneles CLT podría ser una salida al volumen elevado de madera sin destino industrial actual. Al ser, estos paneles, conformados por múltiples capas de madera aserrada, las bajas propiedades mecánicas de la madera no suponen una limitante, compensando el mayor volumen de madera necesario, para cumplir una función estructural, con un bajo costo de la materia prima.

La madera aserrada de partida, proveniente de raleos, presentó valores de propiedades mecánicas, obtenidas a partir de ensayos experimentales de una muestra de 40 probetas, menores a los correspondientes a una clase resistente europea C14, limitado por un valor característico de resistencia a flexión de 9.1 N/mm².

La densidad característica de los cinco paneles, obtenida a partir de la densidad de las tablas que conforman cada capa varió entre 413 y 440 Kg/m³.

La resistencia a flexión obtenida a partir de ensayos de panel, varió entre 17 y 25 N/mm², con un valor promedio de 22 N/mm² para los cinco paneles ensayados. Se observa que el valor medio de resistencia a flexión obtenido por ensayo de panel es ligeramente menor que el obtenido mediante ensayo de las tablas que lo componen. Asimismo, el módulo de elasticidad global promedio obtenido a partir del ensayo experimental de los paneles CLT (6685 N/mm²) fue menor que el de las tablas de madera aserrada (7155 N/mm²).

Se considera necesario realizar ensayos de un mayor número de paneles CLT fabricados con esta madera, así como mayor número de ensayos de tablas de madera, asociadas a una clasificación visual, para estudiar si esta disminución de resistencia se debe a la clasificación de la madera o al proceso de fabricación de los paneles.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dieste A. Programa de promoción de exportaciones de productos de madera. Informe 1. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industrias, Energía y Minería. Consejo Sectorial Forestal-Madera. Uruguay. 35 p., 2012
- [2] MIEM, Ministerio de Industria, Energía y Minería. Planes Industriales. Fase I. Mastergraf S.R.L., 2012
- [3] EN 338:2016. Structural timber. Strength classes. CEN/TC 124
- [4] Moya L., Cardoso A., Cagno M., O'Neill H. Structural characterization of pine lumber from Uruguay. *Maderas-Cienc Tecnol* 17(3): 597-612, 2015
- [5] Baño V., Moya L., O'Neill H., Cardoso A., Cagno M, Cetrangolo G., Domenech L. Technical documents for standardization of timber structures and construction. Technical Report. Fondo Industrial PR n°: 3823/013. Dirección Nacional de Industria. Ministerio de Industria, Energía y Minería. ISBN: 978-9974-0-1344-5, 2015
- [6] EN 16351:2015. Timber structures. Cross laminated timber. Requirements. CEN/TC 124
- [7] ANSI/APA, Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber, PRG 320-2012, Tacoma, Washington
- [8] Smith, Simon (2015). Viability of cross-laminated timber from UK resources. Article in *Construction Materials* 168(3):110-120 · June 2015 DOI: 10.1680/coma.14.00064
- [9] G Marko, L Bejo, P Takats. (2016). Cross-laminated timber made of Hungarian raw materials.3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes (IC-CMTP3) IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 123 (2016) 012059 doi:10.1088/1757-899X/123/1/012059
- [10] EN 408:2010+A1:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. CEN/TC 124
- [11] UNE EN 384 (2010). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- [12] EN 338 (2010). Madera estructural. Clases resistentes.
- [13] Wallner-Novak, M; Koppelhuber, J. and Pock, K. (2014) Cross-Laminated Timber Structural Design. Basic design and engineering principles according to Eurocode. Pro:Holz Austria. ISBN: 978-3-902026-03-6
- [14] UNE EN 1995-1-1:2006. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación
- [15] Bauer, H; Schickhofer, G. (2016). Test configurations and analysis for determining characteristic properties of cross laminted timber (CLT). World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), August 22-25, 2016, Vienna, Austria