



EDIFICIO DE MADERA COTRALAMINADA AISLADO SÍSMICAMENTE

SEISMIC ISOLATED CLT BUILDING

Peter Dechent^{1*}, Frane Zilic¹, Daniel Dolan², Diego Riveros³, Gian Giuliano³, Francisco Ávila³

¹Universidad de Concepción. Concepción, Chile

²Washington State University, USA

³G&D Arquitectura, Ingeniería e Inv. Ltda. Concepción, Chile

P.Dechent (Prof.), F.Zilic (Prof.), D.Dolan (Prof.), D.Riveros (Ing.), G.C.Giuliano (Ing.), F.Ávila (Ing.)

* Contacto: Peter Dechent, correo electrónico: pdechen@udec.cl

CÓDIGO: 4650581

Resumen

El trabajo presenta los resultados de diseño de una torre de ocho pisos en base a muros y losas de paneles de CLT utilizando pino radiata chileno. La torre se emplazará en la ciudad de Concepción y tiene como objetivo sentar las bases del diseño y construcción de edificios de CLT en Chile. Como una manera de hacer factible la construcción y de no infringir las normas de diseño vigentes en Chile, la torre se construirá sobre un sistema de aislación sísmica. El diseño sísmico convencional de estructuras de base fija para materiales no incorporados exige por norma un factor de reducción de la respuesta estructural $R=2$, el cual limita considerablemente la altura del edificio. Debido a la poca experiencia que se posee Chile para el diseño sísmico de este tipo de estructuras, es necesario recurrir a normas internacionales complementarias a las normas chilenas.

Por tratarse de una estructura de bajo peso, es necesaria la incorporación de masa adicional para generar una resistencia ante fuerzas como el viento y el volcamiento provenientes del sismo, dicha masa adicional se logra al aumentar el volumen de la losa de hormigón sobre el sistema de aislación.

Finalmente, el diseño en este tipo de estructuras queda controlado principalmente por las conexiones entre los elementos estructurales ya sean tensores, elementos de placas o tornillos. Se analizaron dos alternativas de diseño utilizando el sistema plataforma y el sistema *Balloon*, decidiéndose por éste último por lograr reducir la cantidad de conectores y con ello los costos asociados.

Palabras-clave: Aislación sísmica, CLT, conectores

Abstract

This paper presents the results of an investigation with the purpose of elaborating the bases for the construction in Chile of an eight story building structured with walls and slabs of CLT made out of Chilean Radiata Pine. As a way of doing the construction feasible and without overstepping any design codes in Chile, the building is to be built with seismic isolation, which on the other hand gives architectural freedom by reducing the seismic demand. The conventional seismic design (with fix base) of timber structures demands a reduction factor of $R = 2$, which limits considerably the amount of stories that can be built. Due to the lack of experience that Chile has for the design of this type of structures, it is necessary to use international standards complementary to the Chilean codes.

It's worth to point that because the structure is light, it is necessary to add additional mass to generate resistance for forces such as wind and to overcome the forces of overturning due to earthquakes. This additional mass is reached by increasing the volume of the concrete topping slab over the isolation system. Finally, the design in this type of structures is controlled mainly by the connectors between the structural elements, i.e. tensors, metal plates or screws. Two design alternatives were analyzed, platform system and balloon system, the latter being chosen because it achieved a reduction of the number of connectors, hence reducing the costs.

Key words: Seismic isolation, CLT, connectors.



1. INTRODUCCIÓN

La construcción de edificios de madera en Chile se encuentra aún en una etapa de aprendizaje, donde si bien existen construcciones en madera en edificios que utilizan madera aserrada y madera laminada, el país aún se encuentra desarrollando normativas de diseño para la construcción en las tipologías de marco liviano y paneles de madera contralaminada. Este trabajo recoge la experiencia chilena (González *et al.*, 2014) junto con investigaciones (CLT Handbook 2013; Popovski *et al.*, 2014; Ashtari *et al.*, 2014; Spickler *et al.*, 2015; Brandner *et al.*, 2016) y normas internacionales (NDS 2018; EN 1995-1-1:2004+1) con el propósito de poder desarrollar procedimientos de análisis y diseño estructural del proyecto “Torre en Altura Edificio CLT”. El proyecto en cuestión se trata de un edificio destinado a oficinas, y consta de ocho pisos más un subterráneo, de altura de 25 m (sin considerar el subterráneo) y un área en planta de 90 m² aproximadamente. El edificio estará ubicado en el campus de la Universidad de Concepción, comuna de Concepción, Chile y se encuentra estructurado en base a muros y losas de paneles de CLT (*Cross-Laminated Timber*) fabricados utilizando pino radiata chileno.

A la fecha en Chile no existen edificios de uso público en CLT que sobrepasen los 2 pisos de altura, además las actuales normas de diseño sísmico (NCh433.Of1996 Modificada en 2012) y diseño en madera (NCh1198:2014) no entregan parámetros para el diseño en CLT como material estructural. Actualmente existen investigaciones (González *et al.*, 2014) abocadas en incluir el CLT en las normas nacionales, mientras que algunas normas internacionales (NDS 2018) ya comienzan a incluir este material.

El edificio utiliza la aislación sísmica con el fin de poder hacer factible el proyecto. De esta manera, en este edificio se utilizó el sistema estructural tipo *Balloon*, estructurado en base a muros y losas de CLT, además de vigas de CLT y MLE (Madera Laminada Encolada). La torre de madera descansa sobre un sistema de aislación basal tipo FPS (*Friction Pendulum System*). La finalidad del sistema de aislación consiste en reducir las sollicitaciones sísmicas y permanecer fija para cargas de viento. Ante el actual contexto nacional, el edificio se diseñó considerando un factor de modificación de la respuesta estructural para estructuración o materiales no clasificados $R=2$. La estructura se ubica en zona sísmica III y suelo tipo D según la clasificación entregada por la NCh433.

La estructura sobre el nivel de aislación posee muros de CLT de 165 mm y 231 mm de espesor y losas de CLT de 241 mm de espesor que trabajan de manera colaborante con una capa de HA (Hormigón Armado) de 60 mm de espesor.

El sistema de aislación basal cuenta con diez aisladores FPS, cada uno de ellos apoyado sobre un pedestal de 250 cm de altura que transmite las cargas directamente a una losa de 70 cm de espesor bajo el sistema de aislación (en contacto con el suelo de fundación). La losa sobre la interfaz de aislación tiene 100 cm de espesor.

La estructura fue diseñada inicialmente utilizando el sistema tipo plataforma, lo que condujo a una cantidad importante de conexiones además de un requerimiento de refuerzo en los sectores de contacto de los muros y las losas de CLT para poder resistir las cargas de aplastamiento de la madera normal a sus fibras en las placas de los primeros pisos. Si bien del punto de vista técnico el sistema plataforma es factible de construir, la cantidad de conexiones eleva de manera importante sus costos. Por lo que finalmente se decide por



analizar la construcción tipo *Balloon* llegando a una factibilidad económica más favorable.

Al utilizar el sistema *Balloon* se incorpora un sistema de barras de postensado en toda la altura del edificio para controlar la estabilidad y levantamiento ante cargas de sismo y viento. Dichas barras pasan por el interior de los muros a través de agujeros prefabricados. Los elementos estructurales de madera en general se unen a través de placas metálicas y tornillos.

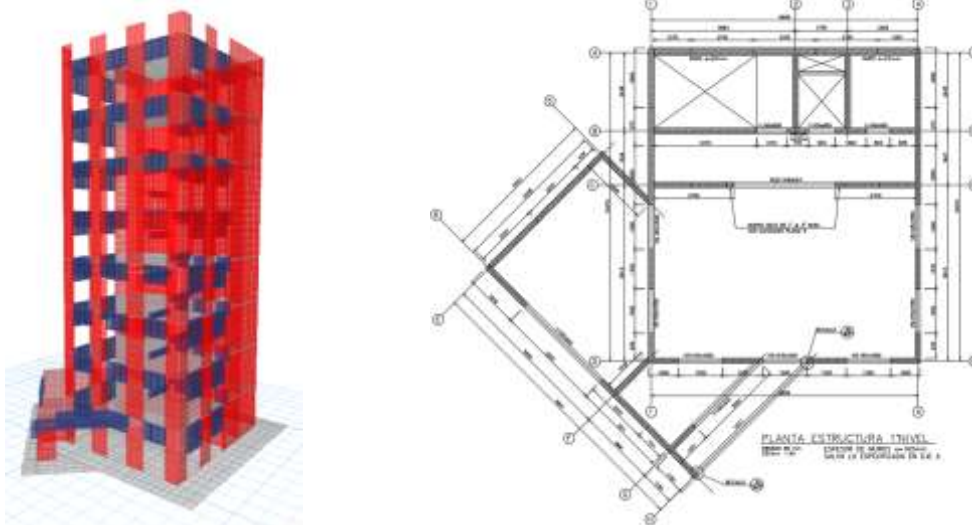


Figura 1.1 Modelo estructural vista 3D y planta primer nivel

2. METODOLOGÍA

2.1. Modelación

Se realizó modelación tridimensional completa con el *software* ETABS, la cual considera las condiciones de apoyo, las características de los elementos principales, las propiedades de los materiales, las cargas de diseño y la geometría de la estructura.

2.2. Estructura

Se realizaron las siguientes consideraciones:

- a) Las losas y vigas de CLT que unen muros se consideraron como simplemente apoyadas, es decir, no transmiten momento a los muros.
- b) Los muros que se intersectan de manera perpendicular estructuralmente no se consideraron como muros compuestos (con forma de L, T, C, Z, I u otros), es decir, no hay una línea de traspaso de esfuerzo en la intersección de muros perpendiculares.



- c) Los muros que se intersectan de manera paralela estructuralmente se consideraron como muros completos en su longitud, es decir, existe una línea de traspaso de esfuerzo en la intersección de muros paralelos.
- d) Si bien los elementos de CLT se modelaron isotrópicamente, el módulo de elasticidad fue reducido por la razón $(n^\circ \text{ de capas verticales}) / (n^\circ \text{ total de capas})$, esto con el fin de considerar la acción en el plano de los paneles (Vassallo *et al.*, 2013; Yasumura *et al.*, 2015). Ejemplo de lo anterior en el caso de los muros es considerar solo el aporte de las capas verticales.

2.3. Sistema de aislación basal

Con el fin de disminuir las fuerzas de corte en la estructura, se propone el uso de FPS (*Friction Pendulum System*) como sistema de aislación basal. La Figura 2.1 muestra la disposición general de los FPS, representados como círculos achurados.

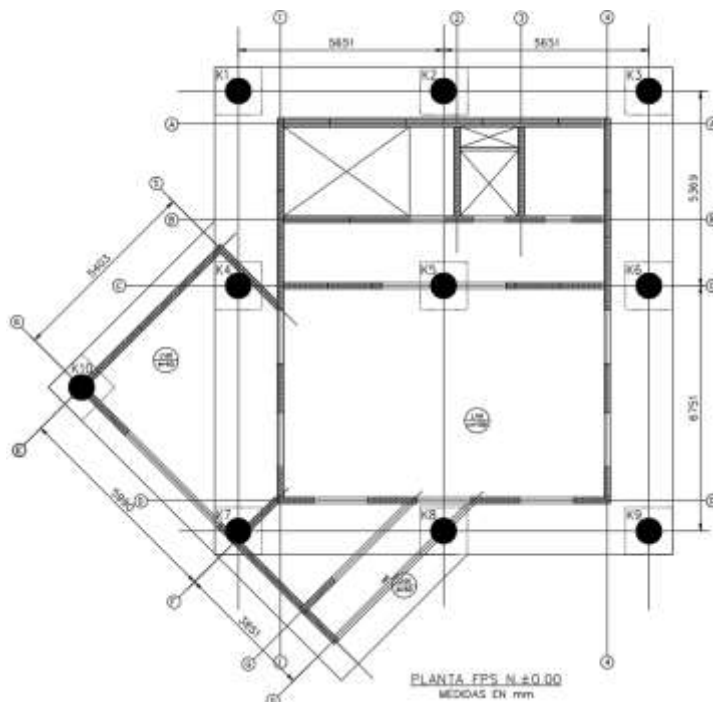


Figura 2.1 Disposición FPS, vista en planta

2.4. Conexiones en madera

Para las uniones entre elementos de madera, se utilizaron conexiones a través de tornillos cruzados (en 45°), ya sea en conexión entre muros, conexión entre losas, conexión entre losa y muro y conexión en tornillos de losa colaborante. Además se utilizaron conectores metálicos típicos como angulares, *hold-down* y placas perforadas.

Las capacidades de los tornillos fueron calculadas utilizando las disposiciones de la NCh1198, estas son de dos tipos: capacidad de extracción lateral para tornillos en placas de acero y capacidad de extracción directa para tornillos cruzados.



Los tornillos cruzados tienen la distribución de fuerzas que se muestra en la siguiente figura, donde:

- $P_{ed,dis}$: Capacidad de extracción directa de diseño para un tornillo,
- $P_{dis,par}$: Capacidad de diseño del par de tornillos cruzados.

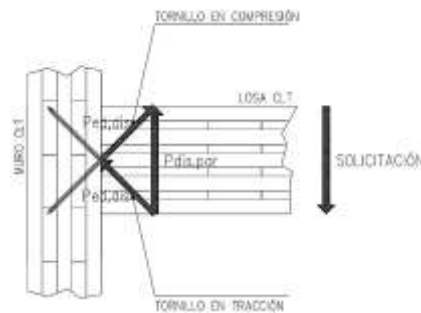


Figura 2.2 Fuerzas en tornillos cruzados

Tomando como consideración que la capacidad de la zona en compresión es igual a la zona en tracción (ETA-13/0699), se tiene que la capacidad de un par de tornillos cruzados es:

$$P_{dis,par} = \sqrt{2} * P_{ed,dis} \quad (2.1)$$

Esto aprovecha la capacidad a extracción directa de los tornillos la cual es considerablemente mayor a la capacidad en extracción lateral.

Con respecto a las cargas sobre las conexiones, por ejemplo en la conexión entre muros, las solicitaciones se extrajeron a partir de las cargas horizontales de la estructura a partir de dos situaciones:

- Corte rasante a partir del corte por piso,
- Corte rasante por carga de barras de postensado.

En la Figura 2.3 se muestra dos esquemas con las situaciones anteriormente descritas.

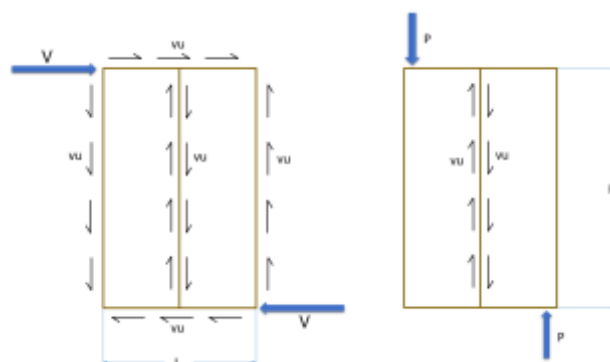


Figura 2.3 Esquemas de fuerza de corte rasante

El esquema de la izquierda muestra el corte rasante $v_u = V/L$ producido por el corte horizontal que se trasmite a nivel de piso, el esquema de la derecha muestra el corte rasante $v_u = P/H$ producto de la fuerza máxima producida por las barras de postensado. Ambas situaciones entregan valores superiores de diseño para las cargas sísmicas.



3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Fuerzas de corte por piso

La Figura 3.1 muestra los cortes de diseño para cada piso en las direcciones principales de la estructura, se comparan fuerzas sísmicas utilizando factor de reducción de la respuesta estructural $R=2$ y fuerzas de activación del sistema de aislación (iguales a fuerzas por viento) amplificadas 1,5 veces, además, a modo de comparación, se muestran los cortes considerando la estructura con base fija con análisis modal espectral según la NCh433.Of1996 Modificada en 2012. Se consideró un coeficiente de fricción de diseño del 5%, aunque fue analizado para 4 y 7% a efecto de incorporar de manera sencilla su posible variabilidad y efectos en el diseño. Para la Figura 3.1 tener en consideración lo siguiente:

- V_W : fuerza de corte por viento,
- $V_{S_7\%}$: fuerza de corte por sismo para el coeficiente de fricción del 7%,
- $V_{S_4\%}$: fuerza de corte por sismo para el coeficiente de fricción del 4%,
- $V_{S_{BF}}$: fuerza de corte por sismo para la estructura con base fija.

De las figuras se observa una considerable reducción de las fueras de diseño en la estructura con base aislada en comparación a base fija. También se observa que las fuerzas producidas por el viento son comparables a las fuerzas sísmicas.

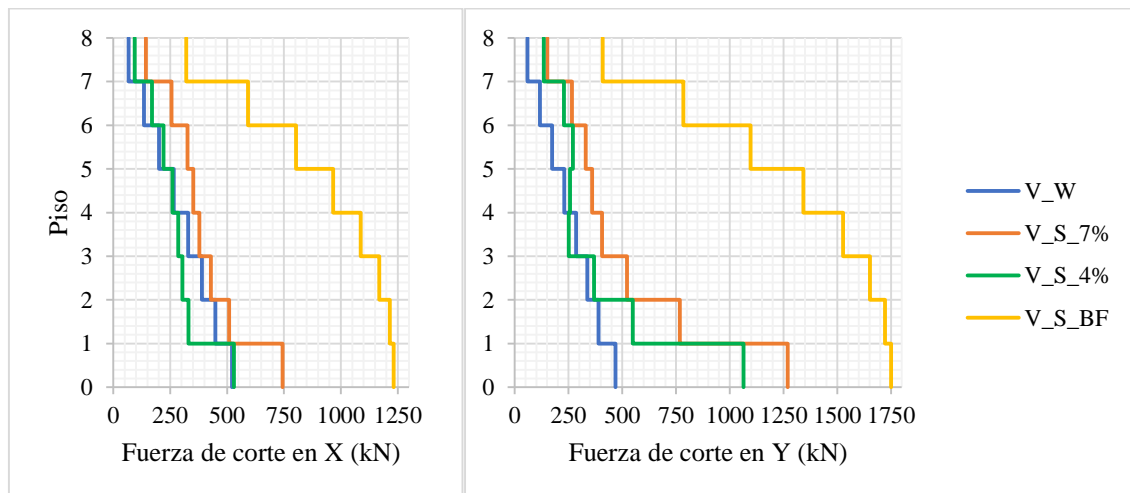


Figura 3.1 Cortes de diseño para la superestructura en dirección X e Y respectivamente

3.2. Drift por piso

Los resultados de análisis permiten concluir que se cumple con los requerimientos de diseño para desplazamientos entre pisos según la norma NCh433 que es más exigente que la norma NCh2745. La Figura 3.2 muestra los *drift* de entre piso para distintos estados de carga, tener en consideración lo siguiente:

- D_W : drift por viento,
- $D_{S_7\%}$: drift por sismo para el coeficiente de fricción del 7%,

- D_S_4% : drift por sismo para el coeficiente de fricción del 4%,
- Lím_ : límites de drift establecidos por las normas NCh433 y NCh2745

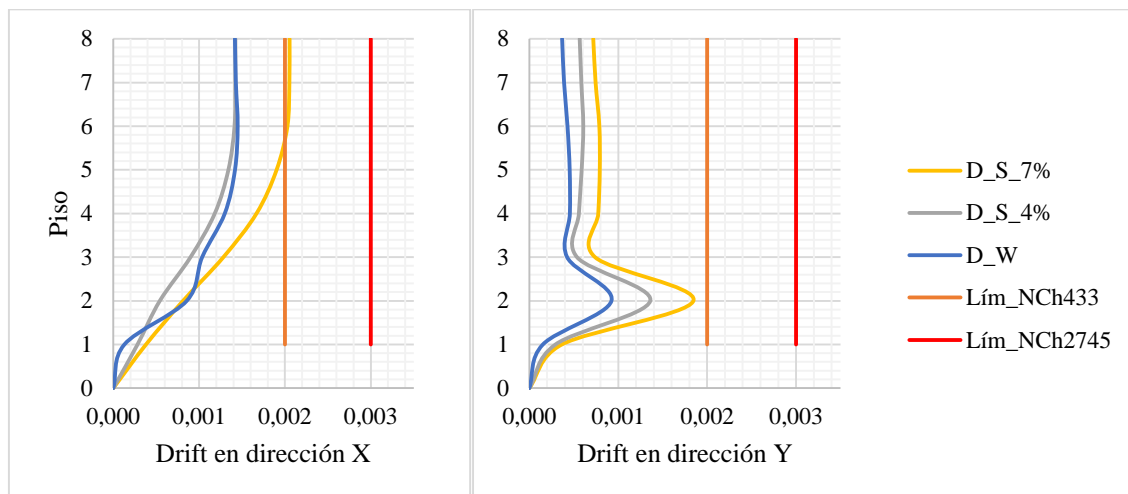


Figura 3.2 Drift de diseño para la superestructura en dirección X e Y respectivamente

3.3. Desplazamientos FPS

Los máximos desplazamiento en los FPS se alcanzan para el menor coeficiente de fricción $\mu_{\min} = 4\%$ y aplicando el sismo máximo posible establecido en la NCh2745. Según la nomenclatura mostrada en la Figura 2.1, el máximo desplazamiento horizontal ocurre para el aislador K3 con 341 mm. Los demás aisladores poseen similares deformaciones.

3.4. Conexiones en madera

La conexión de tornillos cruzados más solicitada corresponde a la conexión de muros paralelos. Esta conexión debe resistir las fuerzas de corte entre los paneles de muro para que en conjunto trabajen como una unidad. En el caso de los muros de 165 mm de espesor (5 capas) se requiere, por diseño, tonillos de diámetro $\Phi=11\text{mm}$ y largo $L=280\text{mm}$ dispuestos en diagonal (45°) cada 140 mm. La Figura 3.3 muestra lo anterior.

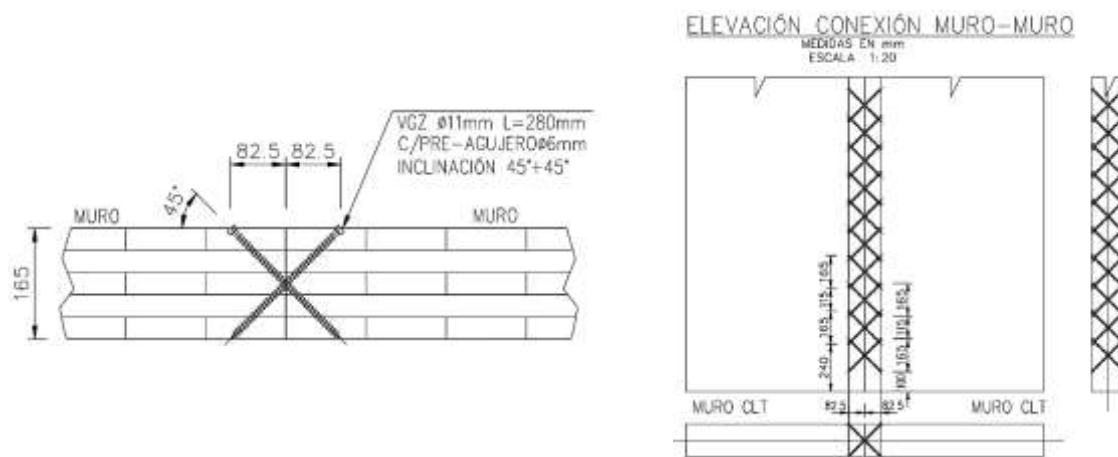


Figura 3.3 Detalle conexión muro-muro, vista en planta y elevación (mm)



En el detalle de la conexión entre muros paralelos mostrado en la Figura 3.3, se aprecia la disposición de los tornillos doblemente inclinados, es decir, en 45° vistos en planta y en 45° vistos en elevación. Además las conexiones de la losa al muro y entre paneles de losa se muestran en la Figura 3.4 y Figura 3.5 respectivamente.

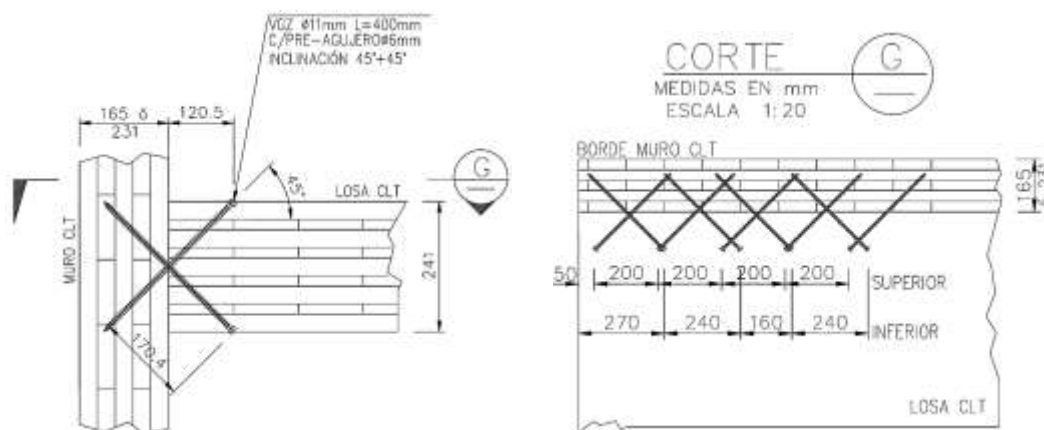


Figura 3.4 Detalle conexión muro-losa, vista en elevación y planta (mm)

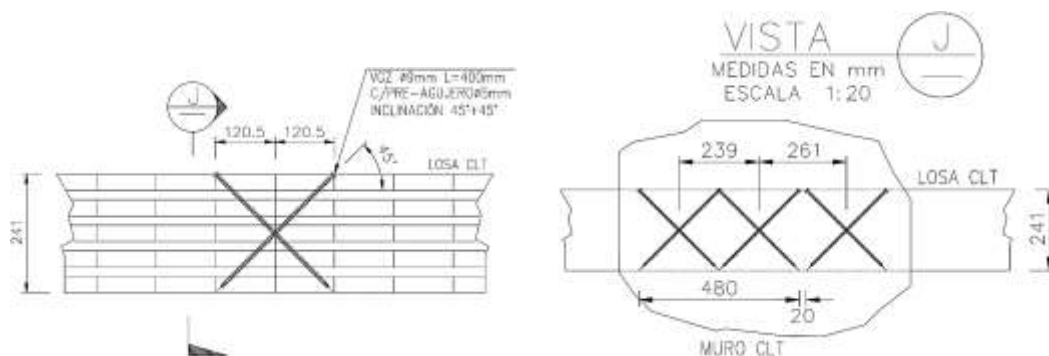
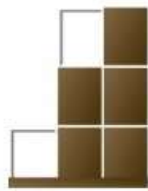


Figura 3.5 Detalle conexión losa-losa, vista en elevación y planta (mm)

3.5. Comparación con sistema plataforma

Análogamente al sistema constructivo tipo *Balloon* descrito anteriormente, se realizó el diseño de la torre de CLT en base al sistema tipo Plataforma, dicho sistema fue descartado luego del análisis de costos realizado. Económicamente hablando para este caso en particular, una desventaja del sistema plataforma fue el mayor costo asociado a la cantidad de conectores requeridos, como ángulos de corte, *hold-down*, entre otras placas perforadas (de mayor costo en comparación con tornillos cruzados).

La Figura 3.6 muestra vistas en elevación de un eje típico diseñado para ambos tipos de métodos constructivos (*Balloon* y Plataforma respectivamente). En ella se observa la mayor cantidad de placas requeridas en el sistema Plataforma (imagen derecha), y un mejor aprovechamiento del largo de los paneles utilizados en el caso del sistema *Balloon*. La longitud de los paneles han ha sido escogidas considerado las limitaciones de transporte por medio de *container*, en este caso 10,85 m.



CLEM
2019 | 18 al 20 de noviembre
Hotel Cottage
Montevideo - Uruguay



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

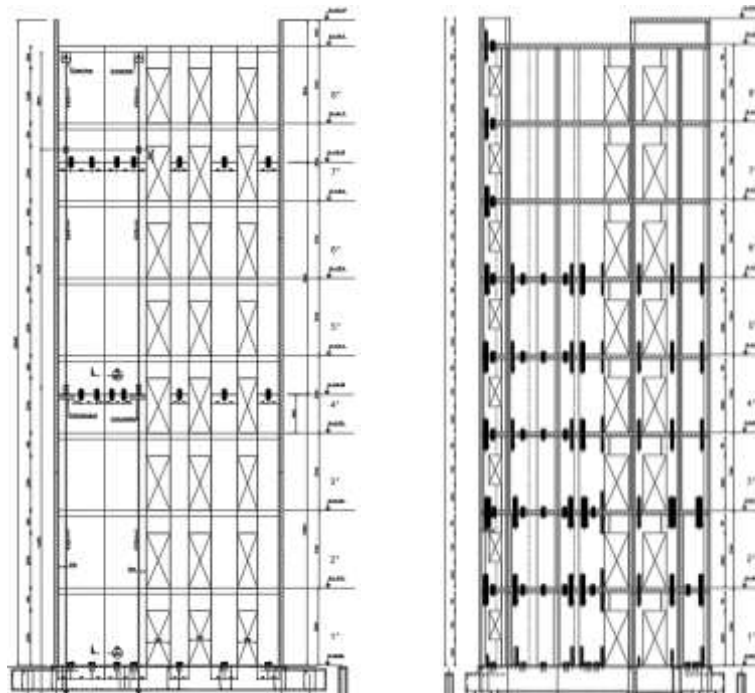


Figura 3.6 Conectores sistema constructivo Baloon y Plataforma, vista en elevación

4. CONCLUSIONES

- El factor de modificación de respuesta estructural (R) de la normativa chilena actualmente limita considerablemente el diseño en este tipo de estructuras. En este proyecto en particular se utilizó la aislación sísmica para reducir las solicitaciones y poder hacer factible el proyecto.
- En general, el diseño en muros de CLT queda controlado por las conexiones y no por la resistencia intrínseca del panel a corte o flexo-compresión.
- Los tornillos cruzados logran satisfacer la capacidad requerida en las conexiones entre paneles de CLT, ahora bien, las resistencias calculadas se obtuvieron en base a los requerimientos de la NCh1198 la cual no considera directamente la capacidad de tornillos en CLT.
- Se utilizó un sistema de barras de postensado, el cual proporciona capacidad suficiente ante fuerzas volcantes. El diseño mediante conectores tipo *hold-down* para tomar dichas cargas resultaría en una cantidad excesiva de conectores, elevando los costos.
- Las dimensiones de los paneles de CLT se ve limitado por el tamaño del transporte.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo e interés de los alumnos del Área de Estructuras de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción, que integraron el grupo de desarrollo de estructuras de madera, así como a la dirección del Departamento de Ingeniería Civil por las facilidades concedidas que hicieron posible la realización de esta investigación.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSI (2018) **Standar for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. ANSI/APA PRG 320-2018.** American National Standards Institute. Estados Unidos.
- Ashtari, S., T. Haukaas, F. Lam (2014). In-Plane Stiffness of Cross-Laminated Timber Floors. **In WCTE (World Conference on Timber Engineering) 2014.** Québec. Canadá. Agosto.
- AWC (2018) **National Design Specification Design Values for Wood Construction. NDS 2018.** American Wood Council. Leesburg, Estados Unidos.
- Brandner, R., G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer y A. Thiel (2016) Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal of Wood and Wood Products. 74(3).** 331-351.
- EN (2004). **Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. EN 1995-1-1:2004+1.** Europäische Norm. Bruselas, Bélgica.
- European Technical Assessment.** ETA-13/0699 of 14 June 2018.
- FPInnovations (2013). **CLT: Handbook Cross Laminated Timber.** U.S. Edition. Estados Unidos.
- González, P., C. Burgos, E. Pérez, F. Piña, E. Saavedra y M. Wagner (2014) **Sistema constructivo en madera contralaminada para edificios. Estudios de ingeniería para introducir en Chile un sistema constructivo de rápida ejecución para edificios de mediana altura, utilizando elementos de madera contralaminada.** (<http://www.conmaderausach.cl/index.php/material-de-descarga>).
- INN (2010) **Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones. NCh432.Of2010.** Instituto de Normalización Nacional. Santiago.
- INN (1996) **Diseño sísmico de edificios. NCh433.Of1996 Modificada en 2012.** Instituto de Normalización Nacional. Santiago.
- INN (2014) **Madera – Construcciones en Madera – Cálculo. NCh1198:2014.** Instituto de Normalización Nacional. Santiago.
- INN (1991) **Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata. NCh2165.Of91.** Instituto de Normalización Nacional. Santiago.
- INN (2013) **Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. NCh2745.Of2013.** Instituto de Normalización Nacional. Santiago.
- Popovski, M., I. Gavric y J. Schneider (2014) Performance of two-storey CLT house subjected to lateral loads. **FP Innovations Research Rep., FPIPRODUCT-1-6896.** Vancouver. BC. Canadá.
- Spickler, K., M. Cloßen, P. Line y M. Pohl (2015) Cross Laminated Timber Horizontal: Diaphragm Design Example. **CLT White paper (2015).**
- Yasumura, M., K. Kobayashi, M. Okabe, T. Miyake y K. Matsumoto, K. (2015). Full-scale tests and numerical analysis of low-rise CLT structures under lateral loading. **Journal of Structural Engineering. 142(4).** E4015007.