



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Mg. Franco Benedetti Leonelli.

Miembros de Comisión: Mg. Alan Jara Cisterna.

Mg. Alexander Opazo Vega.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE
DIAFRAGMAS DE PISO DE CLT EN ESTRUCTURAS DE
MEDIANA ALTURA

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Ingeniero Civil.

DIEGO ALEJANDRO FUENTES CONCHA

Concepción, 17 de junio 2022.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi madre Gilda que me ha brindado su total apoyo en todo momento y en especial ahora para que termine con éxito esta etapa de mi vida, le agradezco por su amor y paciencia en los momentos difíciles por los que pasé a lo largo de mi formación universitaria.

Agradezco a todos aquellos que de una u otra forma aportaron en algún momento para que hoy pudiera estar culminando este proceso de mi vida, agradezco a mis hermanos Nahir, Otoniel y Máximo, a mi abuela María y a todos mis amigos que me acompañaron y apoyaron estos años.

Y por último agradezco especialmente a mi grupo de amigos de la universidad, Mauricio, Carolina, Antonia, Lilian, Diego y Benjamín, con los cuales compartí la mayor parte de mis experiencias en la universidad, tanto estudiantiles como vivencias que tuvimos juntos y que estarán siempre en mi corazón.



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE DIAFRAGMAS DE PISO DE CLT EN ESTRUCTURAS DE MEDIANA ALTURA

Autor (a): Diego Fuentes Concha

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: diego.fuentes1601@alumnos.ubiobio.cl

Profesor (a) Patrocinante: Franco Benedetti Leonelli

Ingeniero Civil, Universidad del Bío-Bío, Magister en Ciencias de la Ingeniería,
Universidad de Concepción

fbenedet@ubiobio.cl

Resumen

El uso del sistema de madera contralaminada o CLT, ha ganado gran popularidad en el impulso mundial de la construcción en madera. La mayor resistencia, rigidez y volumen de la madera maciza de CLT, en comparación con la construcción en sistemas de margo ligero convencional, son las características específicas que permiten el aumento de la altura de construcción en estructuras de madera.

Una de las propiedades de las estructuras a considerar durante la etapa de diseño, es la rigidez en el plano de los diafragmas de piso, los cuales tienen un papel múltiple en el comportamiento estructural de un edificio. En este sentido, se debe establecer un método para determinar la rigidez en el plano de este tipo de sistemas, a fin de clasificarlos dentro de un comportamiento rígido o flexible dado cierto nivel de carga lateral.

Por otro lado, en la construcción de sistemas de CLT las conexiones juegan un papel crucial en el mantenimiento de la integridad de la estructura y en sus propiedades de resistencia, rigidez y ductilidad. Las características de rendimiento de los diafragmas bajo cargas laterales están controladas por conexiones de acero dúctiles, las que deben diseñarse para garantizar que la capacidad de la conexión esté limitada por el rendimiento del sujetador de acuerdo a un determinado modo de falla.

Palabras clave: CLT, madera contralaminada, diafragma rígido.



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE DIAFRAGMAS DE PISO DE CLT EN ESTRUCTURAS DE MEDIANA ALTURA

Autor (a): Diego Fuentes Concha

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: diego.fuentes1601@alumnos.ubiobio.cl

Profesor (a) Patrocinante: Franco Benedetti Leonelli

Ingeniero Civil, Universidad del Bío-Bío, Magister en Ciencias de la Ingeniería,
Universidad de Concepción

fbenedet@ubiobio.cl

Abstract

The use of the cross-laminated timber or CLT system, has gained great popularity within the worldwide promotion of wood construction. The increased strength, stiffness and volume of CLT solid wood, in comparison to conventional lightweight margo construction systems, are the specific characteristics that allow the increasement of construction's height in wood structures.

One of the properties of structures to consider during the design stage is the in-plane stiffness of the floor diaphragms, which has a multiple role in the structural conduct of a building. In this sense, a method must be established to determine the in-plane stiffness of this type of systems, in order to classify them within a rigid or flexible conduct, depending on a certain level of lateral load.

On the other hand, in the construction of CLT systems, the connections play a crucial role on maintaining the integrity of the structure and its strength, stiffness and ductility properties. The performance features of diaphragms under lateral loads are controlled by ductile steel connections, which must be designed to ensure that the capacity of the connection is limited by the performance of fasteners according to a certain failure mode.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----|
| Capítulo 1 ANTECEDENTES GENERALES | 3 |
| 1.1. Introducción | 3 |
| 1.2. Objetivo general..... | 4 |
| 1.3. Objetivos específicos | 4 |
| 1.4. Metodología..... | 5 |
| 1.5. Estudio del Estado de Arte..... | 5 |
| 1.6. Problema/Oportunidad..... | 6 |
| Capítulo 2 MARCO TEÓRICO | 7 |
| 2.1. Introducción..... | 7 |
| 2.2. Sistemas de conexión | 7 |
| 2.3. Comportamiento de diafragma rígido y flexible | 8 |
| 2.4. Comportamiento estructural de paneles CLT..... | 9 |
| 2.5. Desplazamiento horizontal del diafragma | 10 |
| 2.6. Conclusión..... | 13 |
| Capítulo 3 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE DIAFRAGMA CLT | 14 |
| 3.1. Introducción..... | 14 |
| 3.2. Descripción de modelos..... | 14 |
| 3.2.1. Propuesta de Diseño | 14 |
| 3.2.2. Dimensiones de los Diafragmas de piso de CLT | 14 |
| 3.2.3. Modelo de Elementos Finitos..... | 15 |
| 3.3. Propiedades Mecánicas de los Elementos CLT Utilizados | 15 |
| 3.3.1. Grado de la Madera Utilizada..... | 15 |
| 3.3.2. Contenido de Humedad | 16 |
| 3.3.3. Módulos de Elasticidad | 16 |
| 3.3.4. Módulo de Corte Perpendicular al Plano de Carga | 18 |
| 3.3.4. Módulo de Poisson | 18 |
| 3.4. Supuestos Generales Para el Diseño..... | 19 |



| | |
|---|----|
| 3.5. Diseño de Diafragma con Cargas que Actúan Vertical y Horizontalmente | 19 |
| 3.5.1. Cargas | 19 |
| 3.6. Conclusión | 21 |
| Capítulo 4 SISTEMAS DE CONEXIÓN ENTRE PANELES | 22 |
| 4.1. Introducción | 22 |
| 4.2. Tipos de Uniones | 22 |
| 4.3. Uniones Utilizadas en los Modelos | 23 |
| 4.3. Diseño unión Panel-Panel | 24 |
| 4.4. Conclusión | 28 |
| Capítulo 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS | 29 |
| 5.1. Introducción | 29 |
| 5.2. Desplazamiento del diafragma | 29 |
| 5.3. Modelos de SAP2000 | 29 |
| 5.4. Rigidez, resistencia y ductilidad | 30 |
| 5.4.1 Rigidez del diafragma | 30 |
| 5.4.2 Resistencia del diafragma | 31 |
| 5.4.3 Ductilidad del diafragma | 32 |
| 5.5. Deformación del diafragma | 33 |
| 5.6. Conclusión | 39 |
| Capítulo 6 CONCLUSIONES | 40 |
| REFERENCIAS | 42 |
| ANEXO A | 45 |
| A.1 DISEÑO DE LOSAS CLT | 45 |
| ANEXO B | 56 |
| B.1 SISTEMAS DE CONEXIÓN ENTRE PANELES DE MADERA CONTRALAMINADA | 56 |
| B.2 DIAGRAMAS DE HISTERESIS | 66 |



Capítulo 1 ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Introducción

El laminado transversal de los paneles CLT proporciona propiedades de resistencia y rigidez en el plano y fuera del plano relativamente altas, lo que le da al panel capacidades de acción bidireccional como las de una losa de hormigón armado. El efecto de "refuerzo" proporcionado por la laminación cruzada en CLT también aumenta considerablemente la resistencia a la rotura de CLT para ciertos tipos de sistemas de conexión. Las fuerzas de corte en el plano en diafragmas CLT son resistidas por conexiones de acero, como clavos y tornillos, los cuales proporcionan la mayor parte de la disipación de energía en el diafragma.

Una de las propiedades importantes de las estructuras de construcción que debe considerarse cuidadosamente durante la etapa de diseño, es la rigidez en el plano de los diafragmas de piso. En la literatura hay pocos estudios en relación al comportamiento en el plano de pisos de madera contralaminada (CLT), no definiéndose de manera clara un método para determinar la rigidez en el plano de este tipo de pisos, a fin de clasificarlos dentro un comportamiento rígido o flexible.

En este trabajo de tesis se abordará el diseño de diafragmas de piso de madera contralaminada, estudiando el comportamiento de 9 diseños de diafragmas distintos con variantes de dimensión y espesor de paneles CLT, razón de aspecto del diafragma y sistemas de conexión entre panel.



1.2. Objetivo general

Analizar el comportamiento sísmico de diafragmas de piso de CLT en estructuras de mediana altura a través del desarrollo de modelos computacionales considerando distintos tipos de conexión, razón de aspecto, luz libre y dimensiones de paneles.

1.3. Objetivos específicos

1. Sintetizar el estado del arte del diseño de diafragmas de piso de CLT como diafragma rígido para edificios de mediana altura.
2. Definición de configuraciones variadas de diafragmas CLT considerando variantes en las conexiones de corte entre panel, anchos de panel y luz libre.
3. Desarrollo de modelos no lineales para el análisis de los diafragmas CLT de cada una de las configuraciones definidas en el diseño previo de modelos.
4. Analizar la respuesta sísmica del diafragma en base a los modelos desarrollados y el cumplimiento de los desempeños establecidos por la normativa ASCE 7 y el Eurocódigo.



1.4. Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos propuestos en este estudio, sigue el orden indicado en la figura siguiente (Fig. 1):

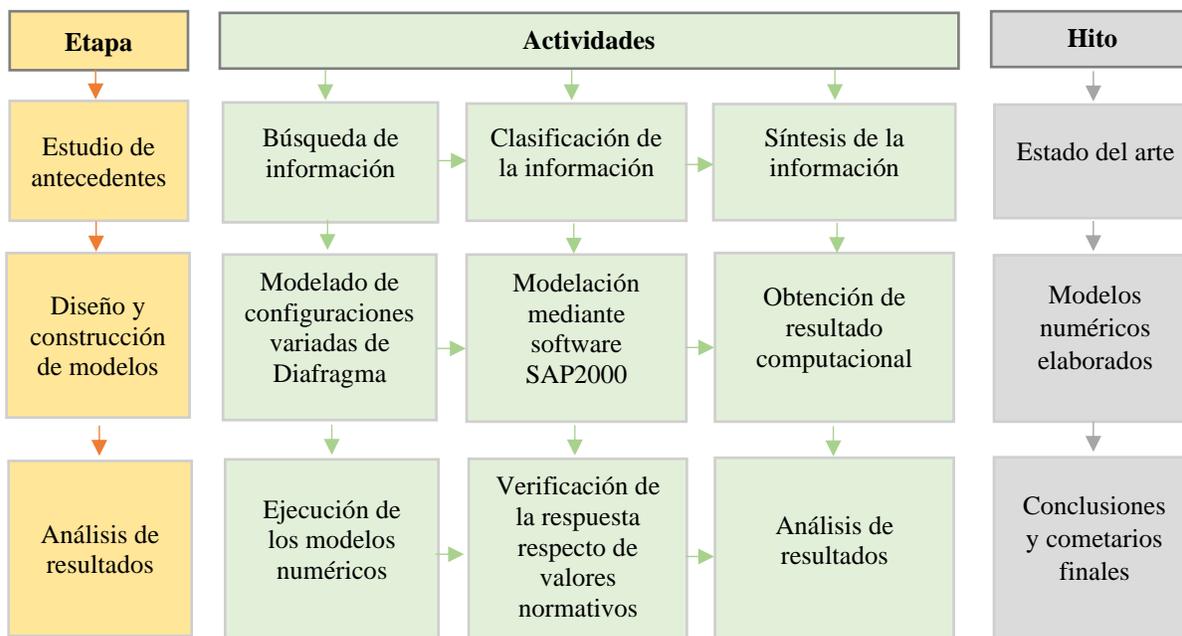


Figura 1. Diagrama de metodología de trabajo.

A continuación, de manera breve se entrega una descripción de las etapas mostradas en la metodología de trabajo de esta investigación.

1.5. Estudio del Estado de Arte

Se realizó una investigación sobre los productos de madera contralaminada o CLT a nivel internacional, principalmente de aspectos relacionados a su fabricación, propiedades físicas y mecánicas, y aspectos normativos de diseño. Esta investigación es un levantamiento de información en base a estudios realizados a nivel internacional sobre el uso de la madera como material innovador en la construcción de edificios.



1.6. Problema/Oportunidad

Actualmente en Chile hay muy pocos estudios orientados a explicar el comportamiento de estructuras hechas en base a CLT. Por un lado, la respuesta sísmica de este tipo de estructuras en desconocida para nuestro país, no existe una normativa de diseño chilena para este tipo de elementos y, además, no se asegura la rigidez de los diafragmas de piso, lo cual es esencial para las estructuras en un país sísmico como éste, donde en general la normativa prioriza sistemas muy rígidos a fin de tener los menores desplazamientos de entrepiso. Dado esto, hay mucha incertidumbre al momento de pensar en desarrollar proyectos de estas características.

Este trabajo de tesis, plantea la oportunidad de construir distintos modelos de diafragmas de piso de CLT desarrollando distintas configuraciones de diafragma y sistemas de conexión, las cuales posteriormente han de ser analizadas con modelos No lineales mediante el software SAP2000. El fin de esto, es describir la respuesta sísmica y explorar el comportamiento de diafragmas de madera contralaminada, calculando deflexiones y distribuyendo fuerzas laterales al diafragma de piso a fin de verificar sus propiedades de diafragma rígido.



Capítulo 2 MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

En este capítulo se enmarca el desarrollo teórico de diversos aspectos relevantes en el estudio y diseño de diafragmas de madera contralaminada, que incluyen características de su desarrollo industrial y sus respectivos beneficios como material de construcción innovador, procesos de fabricación relevantes, importancia e incidencia del correcto diseño de los sistemas de conexión a utilizar y parámetros relevantes que contribuyen a la determinación del comportamiento de diafragmas de piso de CLT.

2.2. Sistemas de conexión

En la construcción de paneles de madera contralaminada las conexiones juegan un papel crucial en el mantenimiento de la integridad de la estructura y en sus propiedades de resistencia, rigidez, estabilidad y ductilidad. Bajo cargas en el plano los diafragmas de piso o techo de CLT giran como cuerpos rígidos, cuya deformación depende principalmente del comportamiento de los elementos de conexión, pues la deformación de estos proporciona la mayor parte de la ductilidad al sistema. Dado esto, las características de rendimiento de los diafragmas bajo cargas laterales están controladas por conexiones de acero dúctiles, ya que en sí los paneles son significativamente más rígidos. Las conexiones panel a panel en diafragmas de madera contralaminada, han sido ensayadas en diversas investigaciones con el objetivo de analizar su comportamiento (Sullivan, 2018, Anirudh, 2021; Moroder, 2015). Estas conexiones de corte, deben diseñarse para garantizar que la capacidad de la conexión esté limitada por el rendimiento del sujetador de acuerdo con el Modo III según NDS.

En los diafragmas de piso, pared o techo, utilizados para el arriostramiento de la estructura, las fuerzas axiales y las fuerzas de corte longitudinal en las juntas ocurren junto a las fuerzas laterales por acción de cargas verticales. Dependiendo de ese nivel de carga, se pueden conectar juntas a tope con tiras de cubierta fresadas, junta rebajada o junta a tope con tornillos completamente roscados. Los sistemas de sujeción comúnmente utilizados, panel a panel o piso a pared, son sistemas de sujeción mecánicos como pernos, clavos, tornillos autoperforantes u otros. El espaciado adecuado entre las conexiones mecánicas es vital para evitar roturas y fallas por cizallamiento que son frágiles por naturaleza.

La Figura 2.2.1 muestra 3 tipos de juntas utilizadas comúnmente en el diseño de diafragmas CLT. La junta (a) es una conexión que se puede ensamblar rápidamente en sitio, lo cual hace que diseñadores y constructores la prefieran frente a otras opciones. Este tipo de conexión trabaja a corte simple, y su resistencia lateral es inferior frente a otras alternativas más complejas como por ejemplo “*Internal Spline*”, donde la tira de madera aserrada va en el interior de los paneles CLT conectados generando una conexión de doble corte. La junta (b)



se usa comúnmente para conexiones en el plano de elementos de piso y pared, donde se utilizan tornillos autorroscantes. Este tipo de conexión puede resistir el corte en el plano y las fuerzas normales, pero no se considera que sea una conexión resistente al momento (Augustin M. , 2008). Si bien se trata de una conexión muy simple y de fácil montaje (junta b), en paneles de piso es particularmente riesgoso, puesto que puede llegar a partirse en casos de concentración de carga perpendicular. La instalación de tornillos en 45 grados como muestra la junta (c), contribuye a la capacidad de corte de la conexión, ya sea en la extracción del tornillo o en la compresión.

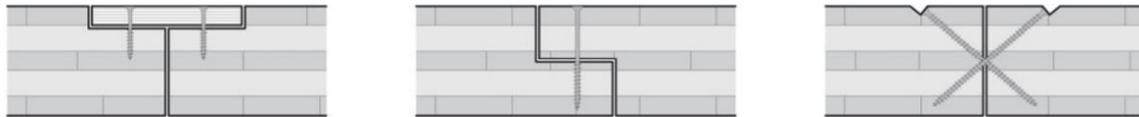


Figura 2.2.1 Diseño de juntas utilizadas con frecuencia (a) Surface Spline, (b) Half Lap, (c) Butt Joint (Wallner-Novak, 2018).

2.3. Comportamiento de diafragma rígido y flexible

El diseño de diafragmas se suele limitar al rango elástico (Moroder, 2015; Anirudh, 2021; Sullivan, 2018). Además de actuar como losas bajo cargas de gravedad, los diafragmas unen todos los demás elementos estructurales y transfieren cargas horizontales al Sistema de Resistencia de Carga Lateral (LLRS). Dependiendo de la rigidez relativa entre el diafragma y el LLRS, el diafragma puede idealizarse como flexible o como rígido. Cuando el diafragma se idealiza como rígido (Figura 2.3.1 a), las fuerzas se distribuyen según la rigidez relativa de los elementos del LLRS. Cuando el diafragma se idealiza como flexible (Figura 2.3.1 b), las fuerzas se distribuyen según áreas tributarias (D. Moroder, 2015). Independiente del supuesto considerado, este debe ser verificado mediante el cálculo de deflexión del LLRS y el diafragma.

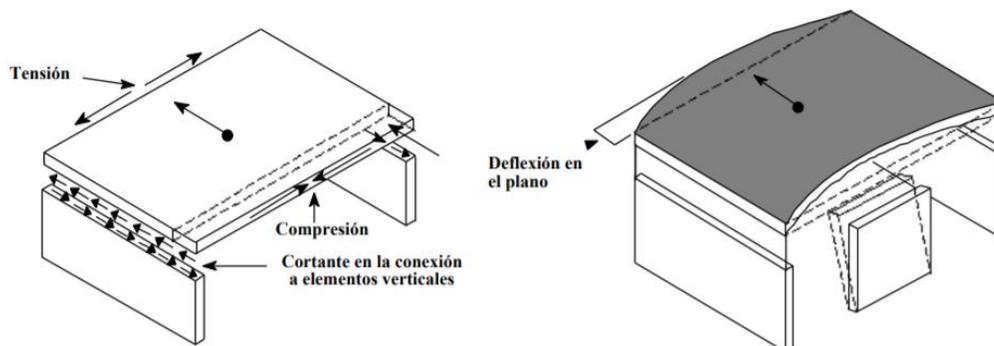


Figura 2.3.1 Comportamiento del diafragma, a) rígido y b) flexible.



Si bien no existe un código de diseño que respalde el comportamiento rígido de diafragmas de piso de CLT, ensayos y ejemplos de diseño de diafragmas de madera contralaminada comprueban un comportamiento rígido de estos (Dujic, 2010; Vassallo, 2013; Anirudh, 2021). Una forma de identificar el tipo de comportamiento del diafragma es a partir del índice de flexibilidad (IF). Este corresponde a la razón entre el desplazamiento máximo del diafragma (δ_{MDD}) y el desplazamiento promedio de los elementos verticales (Δ_{ADVE}) que restringen el diafragma en el respectivo piso (Ver Figura 2.3.2). Diversas fuentes clasifican el comportamiento del diafragma según dos intervalos del IF, aunque este estudio particularmente considera la propuesta de la Norma ASCE 7-16. Esta indica que si el IF es mayor a 2 el diafragma se clasifica como flexible, caso contrario clasifica como rígido.

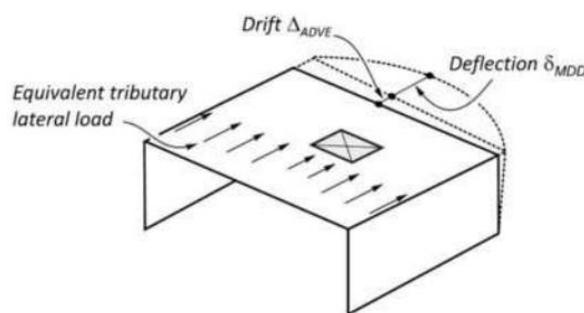


Figura 2.3.2 Flexibilidad del Diafragma (*Engineers, 2016*).

2.4. Comportamiento estructural de paneles CLT

Respecto del efecto carga, la disposición entrelazada de las láminas que conforman los paneles CLT otorgan un mejor comportamiento de contracción y dilatación del propio panel. Horizontalmente, los paneles se tensan en una dirección predominante (Ver Figura 2.4.1), aunque los paneles tienen la capacidad de resistir en las dos direcciones axiales. Verticalmente, dada la alta rigidez al corte proporcionada por las capas entrelazadas, se obtiene un comportamiento mejorado del panel frente al esfuerzo cortante (Wallner Novak, 2013).

La dirección principal de carga es la que posee mayor resistencia, y la dirección perpendicular a esta es la que posee menor resistencia y se considera como una dirección de carga secundaria. Para analizar la capacidad de carga del panel en una dirección, solo se consideran como influyentes en el cálculo aquellas capas orientadas en la dirección de análisis. La cantidad de capas pertenecientes a cada sección neta se indica con el índice “ n ” y se utiliza para las verificaciones en los estados límite últimos. Una consideración importante es que, en la verificación, no se le asigna esfuerzo longitudinal a la dirección transversal a la de análisis; el módulo de elasticidad en dicha dirección se considera como 0.

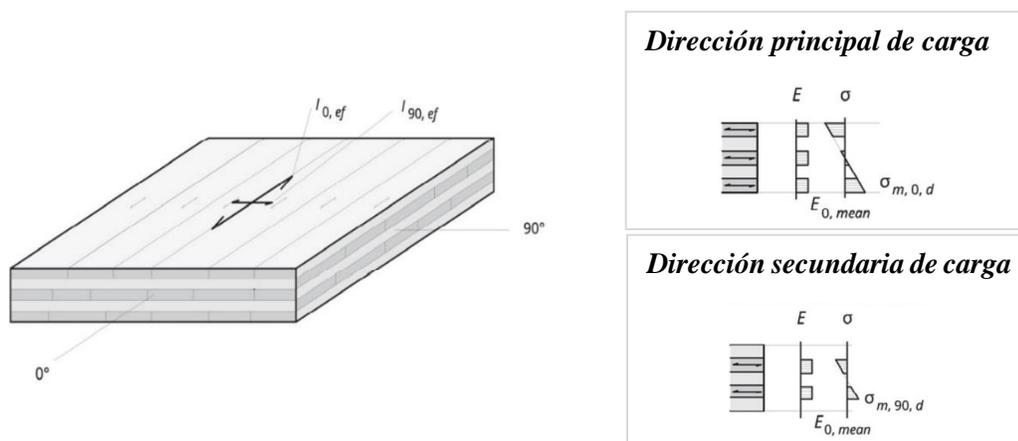


Figura 2.4.1 Panel de madera contralaminada – dirección principal y secundaria de capacidad de carga (Wallner Novak, 2013).

Por lo tanto, las capas transversales se consideran particularmente como capas espaciadoras y solo están sujetas a cizallamiento. Dado esto, se debe observar el esfuerzo cortante en las capas transversales con respecto a la capacidad de carga y la deformación de la madera contralaminada.

2.5. Desplazamiento horizontal del diafragma

El desplazamiento máximo del diafragma (δ_{MDD}), en un diafragma de planta regular con elementos verticales en los bordes, ocurre en el centro de este en la mitad de la distancia entre los elementos verticales de apoyo. Wallner-Novak y col. (2013) discuten el diseño de diafragmas de piso construidos en base a paneles de madera contralaminada y se refieren también a la analogía de la viga profunda como se muestra en la Figura 2.5.1 (a y b).

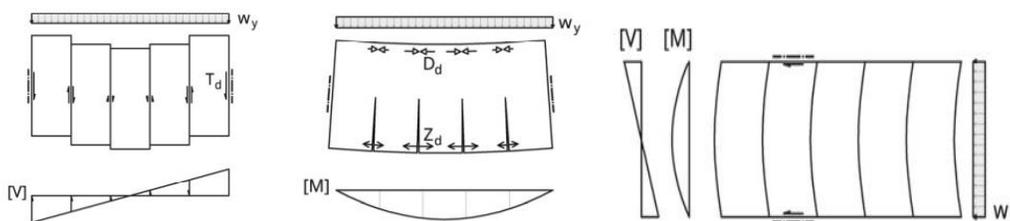


Figura 2.5.1 (a) Cortante a lo largo de las conexiones, (b) Tensión en los bordes del panel, (c) Diafragma como una serie de vigas (Wallner Novak, 2013).



En la figura anterior se indican los mecanismos presentes en diafragmas de piso. Los mecanismos (a) y (b) resultan del impacto en la dirección longitudinal de los paneles (dirección de mayor resistencia), donde las fuerzas de cizallamiento son transferidas por los respectivos sujetadores. Dado que la acción horizontal de la fuerza normalmente actúa en ambas direcciones, las fuerzas de borde tienen dos efectos: una zona de tensión en el panel y una zona de compresión, ambas generadas en los bordes de las juntas. Los impactos transversales a las juntas dan como resultado la flexión de los paneles que actúan en conjunto como vigas horizontales como se muestra en (c) aunque normalmente estas no son relevantes en el diseño.

Para el cálculo de las deformaciones horizontales en el diafragma se utiliza la Ecuación (2.1) de deflexión propuesta por SPDWS (2015). El primer y último término que aluden a la deformación por flexión y deformación debido al deslizamiento de la conexión entre el diafragma y las cuerdas respectivamente, no se considerarán en los cálculos debido que el objetivo de este trabajo de tesis es analizar principalmente el efecto de la deformación de las conexiones entre panel del diafragma sobre la rigidez del mismo, razón por la cual en los modelos de SAP2000 no se incluyeron elementos de cuerda ni conexiones panel-cuerda.

$$\delta_{MDD} = \frac{5vL^3}{8EAW} + \frac{vL}{4G_v t_v} + 0.188Le_n + \frac{\sum(x\Delta_c)}{2W} \quad (2.1)$$

Donde:

- v : Corte por unidad de ancho (lb/ft)
- L : Dimensión del diafragma perpendicular a la aplicación de la fuerza (ft)
- E : Módulo de elasticidad de las cuerdas del diafragma (lb/in²)
- A : Área de la sección transversal de las cuerdas (in²)
- W : Ancho del diafragma en la dirección paralela a la aplicación de la fuerza (ft)
- G_vt_v : Rigidez al corte del panel según su espesor (lb/in)
- e_n : Desplazamiento de las conexiones (in)
- x : Distancia entre la conexión de cuerda al elemento vertical más cercano (ft)
- Δ_c : Desplazamiento de la conexión de las cuerdas inducido por el corte (in)

Uno de los factores importantes a considerar al momento de determinar el desplazamiento lateral del diafragma, es el desplazamiento por corte de los paneles. El segundo término de la Ecuación (2.1) se refiere a esta deformación. Para ser compatibles con las metodologías utilizadas con anterioridad del diseño canadiense, la rigidez por corte del panel se expresará en términos del área efectiva. En este sentido, la Ecuación (2.2) establecida por la normativa CSA 2016 en el apartado 8.4.3.2, permite determinar la rigidez al corte efectiva GA_{eff} de los paneles CLT.



$$GA_{eff} = \frac{\left(h - \frac{t_1}{2} - \frac{t_n}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_y}\right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{t_i}{G_i \cdot b_y}\right) + \left(\frac{t_n}{2 \cdot G_n \cdot b_y}\right)\right]} \quad (2.2)$$

Donde:

- G_i : módulo de corte de las laminaciones en la i-ésima capa (MPa).
- h : espesor del panel (mm) (Figura 2.5.2).
- b_y : ancho del panel (mm).
- t_i : espesor de las capas contralaminadas (mm).
- n : número de capas contralaminadas.

La resistencia y la rigidez al cizallamiento por rodadura en paneles de madera contralaminada se han identificado como un problema clave que puede controlar el diseño y el rendimiento de los sistemas de piso o pared. El módulo de corte por laminación depende de muchos factores como la especie, la densidad de la capa transversal, el espesor del laminado, el contenido de humedad, las configuraciones del patrón de aserrado, el tamaño y la geometría de la sección transversal del tablero, etc. En la literatura, el módulo de corte por rodadura (G_c) generalmente se supone como 1/10 del módulo de corte paralelo a la fibra (G_p). La misma analogía se ha incluido en CSA O86, donde se define además el módulo de corte paralelo a la fibra (G_p) como E/16.

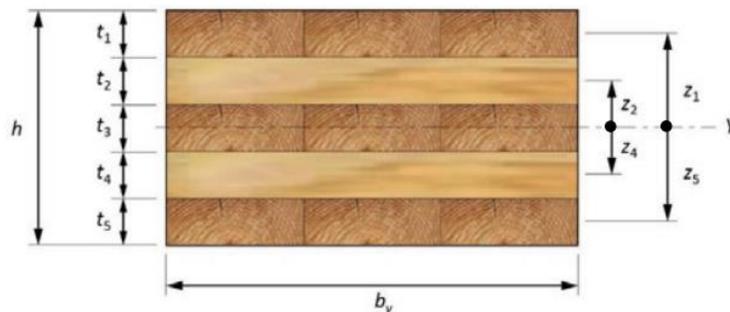


Figura 2.5.2 Propiedades de la sección transversal de un panel CLT de 5 capas en la dirección principal (CSA, 2016).

En este sentido, la deformación por corte del diafragma expresada en términos de la rigidez efectiva quedaría de la siguiente forma:

$$\delta = \frac{wL}{8GA_{eff} \cdot t \cdot B} \quad (2.3)$$



Donde:

- w : carga lateral distribuida aplicada en el diafragma (kN/m).
L : largo del diafragma (m).
B : ancho del diafragma (m).
t : espesor del panel de madera contralaminada (m).

Posteriormente, se realiza la verificación de rigidez del diafragma. Para ello se utilizó el punto 12.3.1.3 del ASCE 7-16 (Engineers, 2016), el cual establece que los diafragmas pueden ser idealizados como flexibles siempre que la deflexión máxima calculada en el plano del diafragma (δ_{MDD}) sea mayor que dos veces el desplazamiento promedio de los elementos verticales (Δ_{ADVE}) de lo contrario el diafragma es rígido. Se tiene entonces la siguiente expresión:

$$\delta_{MDD} > 2 \cdot \Delta_{ADVE} \quad (2.4)$$

Donde:

- δ_{MDD} : desplazamiento máximo del diafragma (mm).
 Δ_{ADVE} : desplazamiento promedio de los elementos verticales (mm).

2.6. Conclusión

El uso del CLT como material constructivo especialmente ligado a la construcción de diafragmas de piso, es un área de investigación en desarrollo donde no se ha establecido un consenso respecto de las metodologías de diseño a emplear. La rigidez en el plano de los diafragmas de piso de madera contralaminada depende en gran parte de los sistemas de conexión empleados en su construcción. Dependiendo del nivel de carga en las juntas varía el tipo de conexión que se emplee, aunque comúnmente se utilizan sistemas de sujeción mecánicos como pernos, clavos y tornillos autoperforantes. El espaciado adecuado entre las conexiones mecánicas es vital para evitar roturas y fallas por cizallamiento que son frágiles por naturaleza. Una forma de identificar el comportamiento del diafragma es a partir del índice de flexibilidad (IF), que corresponde a la razón entre el desplazamiento máximo del diafragma y el desplazamiento promedio de los elementos verticales.



Capítulo 3 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE DIAFRAGMA CLT

3.1. Introducción

En este capítulo se establece el procedimiento para el desarrollo de los modelos de diafragmas CLT, que contempla variantes en sus características de razón de aspecto, espesor de losa según la cantidad de capas y dimensión de los paneles, indicando finalmente parámetros de diseño y propiedades mecánicas de la madera utilizada fundamentales para describir su comportamiento.

3.2. Descripción de modelos

3.2.1. Propuesta de Diseño

Se propone la construcción de una serie de diafragmas de piso de CLT con diferentes configuraciones de razón de aspecto, dimensión de panel, espesor de losa y tipos de conexión. Las secciones, según razón de aspecto (L/B), se dividen en sección cuadrada, rectangular y alargada, donde el valor de cada una de las razones es 1, 2 y 4, respectivamente.

Los modelos de diafragma a construir se dividen en tres grupos, los que difieren principalmente en el espesor y luz libre de la losa. Cada uno de estos tres grupos está conformado por un total de tres diafragmas, los cuales corresponden a diafragmas de sección cuadrada, rectangular y alargada como se indicó. Las dimensiones y características de cada modelo junto con los respectivos paneles CLT utilizados para la construcción de cada uno, se especifican en la Tabla 3.2.2.1.

Los modelos se construirán con cada panel por separado, conectados entre sí mediante conexiones de corte modeladas como sistemas de conexión no lineales. Se analizará la respuesta del sistema de los diafragmas para dos tipos de conexión de corte, en primer lugar, para una conexión Surface Spline y luego para una conexión Butt Joint. Las zonas de conexión en el diafragma son alrededor del eje fuerte de los paneles, con conexiones discretizadas.

3.2.2. Dimensiones de los Diafragmas de piso de CLT

Como se indicó en el punto anterior, los modelos se clasifican en los grupos A, B y C. Las características de espesor y luz libre de cada grupo de diafragmas se indican en la tabla a continuación, junto con las características dimensionales de cada modelo según el tipo de sección:



| Modelos de Diafragma | | Características | | | |
|----------------------|-------------------------|-----------------|---------------|-----------|-----------|
| Grupo | Modelo | Nº capas | Luz libre (m) | Ancho (m) | Largo (m) |
| Diafragmas CLT A | A.1 Sección cuadrada | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | A.2 Sección rectangular | 3 | 3 | 3 | 6 |
| | A.3 Sección alargada | 3 | 3 | 3 | 12 |
| Diafragmas CLT B | B.1 Sección cuadrada | 5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 |
| | B.2 Sección rectangular | 5 | 4.5 | 4.5 | 9 |
| | B.3 Sección alargada | 5 | 4.5 | 4.5 | 18 |
| Diafragmas CLT C | C.1 Sección cuadrada | 7 | 5 | 6 | 6 |
| | C.2 Sección rectangular | 7 | 5 | 6 | 12 |
| | C.3 Sección alargada | 7 | 5 | 6 | 24 |

Tabla 3.2.2.1 Dimensionamiento general tipos de diafragmas CLT.

3.2.3. Modelo de Elementos Finitos

Se utilizó el software SAP2000 v20 para realizar el modelado y análisis estructural de los diferentes diafragmas de piso, los que posteriormente fueron sometidos a diferentes niveles de carga lateral. Los paneles que componen los diafragmas se diseñaron individualmente con una separación de 20 milímetros. En los modelos no se incluyeron elementos tipo muro ni secciones de vigas o cuerdas, sino que se incluyó solamente el modelado de la losa de madera contralaminada y de las conexiones de corte entre panel.

La carga lateral en cada caso fue aplicada como carga distribuida en un costado del diafragma en la dirección principal de carga o eje fuerte de los paneles, a fin de analizar el desplazamiento máximo en las juntas entre paneles producto de las fuerzas de corte inducidas. Posteriormente, como se indica en el Capítulo 5, se realiza la verificación de diafragma rígido o flexible para los diferentes niveles de carga lateral.

3.3. Propiedades Mecánicas de los Elementos CLT Utilizados

3.3.1. Grado de la Madera Utilizada

El grado de la madera estructural utilizada influye directamente en las propiedades mecánicas del material y en su elección respecto de las características que se espera obtener de la losa.



La madera contralaminada a utilizar es de grado C24, según la norma británica BS EN 519, habiendo sido sometida a los requerimientos de resistencia mecánica para los grados estructurales C16 y C24. La madera utilizada en Chile para la fabricación de paneles es el pino radita, material que posee elevadas propiedades intrínsecas de resistencia y densidad. Los módulos de elasticidad de este material son de 10200 MPa en dirección longitudinal y transversal, con una densidad normal media de 476 kg/m^3 según el anexo E de la NCh1198, Tabla E2.

3.3.2. Contenido de Humedad

La madera es un material higroscópico, es decir, tiene capacidad de ceder y absorber humedad del ambiente dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad relativa del entorno en que se encuentre. Este estado higroscópico de la madera se mide a través del contenido de humedad, que se refiere al porcentaje de agua que hay dentro del material, respecto de su masa total. Es una propiedad muy importante de definir con claridad dado que está directamente relacionado con sus propiedades mecánicas. A mayor contenido de humedad las propiedades mecánicas de la madera disminuyen, por lo cual se hace necesario llevar un control de calidad riguroso que asegure un rango aceptable del contenido de humedad del material. El pino radiata seco utilizado para los montajes de madera CLT de grado C24, tiene un contenido de humedad del 12%.

3.3.3. Módulos de Elasticidad

Los módulos de elasticidad de los paneles se determinaron en las 3 direcciones. Por la forma en se definieron los ejes dentro del panel (Figura 3.3.3.1), la dirección U1 (eje x) corresponde a la dirección transversal o dirección secundaria de carga, mientras que la dirección U2 (eje y) corresponde a la dirección longitudinal o dirección principal de carga. El módulo de elasticidad de la madera aserrada de grado estructural C24 es de 10200 MPa en las direcciones longitudinal y transversal.

El módulo de elasticidad en las direcciones U1 y U2 de los paneles se determinan según las siguientes expresiones (Breneman, 2016):

$$E_1 = E_x \cdot \frac{n \cdot t_c}{t} \quad (3.1)$$

$$E_2 = E_y \cdot \frac{m \cdot t_c}{t} \quad (3.2)$$

Donde:

E_x : módulo de elasticidad transversal de la madera aserrada.

E_y : módulo de elasticidad longitudinal de la madera aserrada.

t_c : espesor de las capas contralaminadas (mm).

t : espesor total del panel CLT (mm)

n : n° de capas en la dirección transversal.

m : n° de capas en la dirección longitudinal.

Nota: el espesor de las capas contralaminadas es igual a 60 mm.

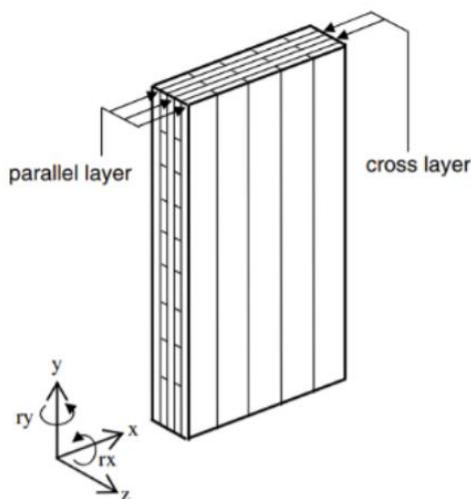


Figura 3.3.3.1 Direcciones en el panel CLT.

El módulo de elasticidad en la dirección U3 se determina según la ecuación propuesta por Ávila (2019). Esta expresión es:

$$E_3 = E_1 \cdot \frac{E_{3A}}{E_{1A}} \quad (3.3)$$

Donde:

E_1 : módulo de elasticidad del panel en la dirección x (MPa).

E_{1A} : módulo de elasticidad en la dirección x utilizado por Ashtari (2009).

E_{3A} : módulo de elasticidad en la dirección z utilizado por Ashtari (2009).

Nota: según lo indicado por Ashtari (2009) los módulos E_{1A} y E_{3A} son 4 GPa y 0.5 GPa, respectivamente.



3.3.4. Módulo de Corte Perpendicular al Plano de Carga

La resistencia y la rigidez al cizallamiento por rodadura se han identificado como un problema clave que puede controlar el diseño y el rendimiento de los sistemas de piso o pared de CLT. El módulo de corte de las laminaciones de madera contralaminada depende de factores como la especie, la densidad de la capa transversal, el espesor del laminado, el contenido de humedad, las configuraciones del patrón de aserrado, el tamaño y la geometría de la sección transversal del tablero, etc. La distribución de tensiones dentro de las capas del panel, dependen en gran medida del módulo de corte de las capas transversales. En la literatura, generalmente el módulo de corte de las capas trasversales se supone como 1/10 veces el módulo de corte paralelo a la fibra (Yasumura et al., 2016; Mestek et al., 2008; Bejtka y Lam, 2008). La misma analogía se ha incluido en la CSA O86. El módulo de corte en el plano xy se obtiene de la siguiente forma (Yasumura, 2016):

$$G_{12} = \frac{E_y}{e_1} \quad (3.4)$$

Donde:

E_y : módulo de elasticidad longitudinal de la madera aserrada (MPa).

e_1 : coeficiente indicado como 16.0 en la literatura (Gagnom y Popovski, 2011).

Los módulos de corte en los planos xz e yz se determinan de la siguiente forma (Yasumura, 2016):

$$G_{13} = \frac{GA_{eff-y}}{A_{full-y}} \quad (3.5)$$

$$G_{23} = \frac{GA_{eff-x}}{A_{full-x}} \quad (3.6)$$

Donde:

GA_{eff-y} : rigidez de corte efectiva en el eje y calculado en el Anexo A.

GA_{eff-x} : rigidez de corte efectiva en el eje x calculado en el Anexo A.

A_{full-y} : área de la sección transversal de todas las capas en “y” calculado en el Anexo A.

A_{full-x} : área de la sección transversal de todas las capas en “x” calculado en el Anexo A.

3.3.4. Módulo de Poisson

El módulo de Poisson es una cantidad adimensional, característica de cada material. Este coeficiente es un indicador de la deformación de una sección de material sometida a la acción de ciertos esfuerzos de tensión o compresión. El cociente entre la deformación trasversal y



la deformación longitudinal producto de estos esfuerzos, es precisamente el coeficiente de Poisson. Los módulos de poisson considerados en cada caso fueron extraídos directamente de Ashtari (2009). Estos son los siguientes:

$$v_{12} = 0.07 \quad v_{23} = 0.35 \quad v_{13} = 0.35$$

3.4. Supuestos Generales Para el Diseño

Todos los modelos descritos en el punto 3.2.1. *Propuesta de Diseño*”, se construirán en primer lugar considerando un ancho de panel b_p igual a 1.2 m, y luego se volverán a construir considerando un ancho de panel b_p igual a 2.4 m. Los modelos de diafragma no cuentan con núcleos de hormigón armado, vigas ni elementos tipo muro. Las luces libres de las losas a modelar serán de 3 m, 4.5 m y 6 m, para las cuales se utilizarán espesores de losa de 180 mm, 300 mm y 420 mm, respectivamente. Las propiedades de la madera CLT utilizada en cada modelo se indican en el anexo B.

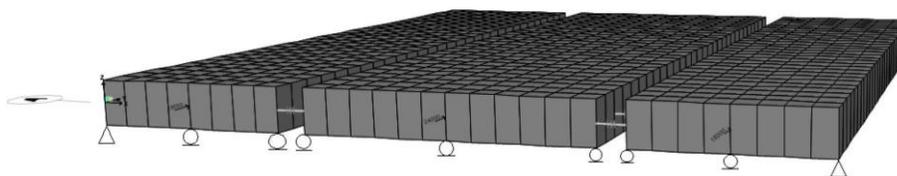


Figura 3.4.1 Modelo de losa CLT con conexión entre paneles.

En las zonas laterales, en el eje fuerte de los paneles de borde de los diafragmas, se incluirán apoyos fijos para controlar el desplazamiento del diafragma; en el eje débil de todos los paneles, se incluirán apoyos móviles permitiendo solamente el desplazamiento en los ejes X e Y.

3.5. Diseño de Diafragma con Cargas que Actúan Vertical y Horizontalmente

3.5.1. Cargas

Cada modelo de diafragma estará sometido a las siguientes cargas:

- a) Carga muerta



Esta carga corresponde al peso propio de cada losa y variará dependiendo del espesor de los paneles CLT utilizados en cada modelo. El procedimiento para obtener esta carga es el siguiente, considerando que esta actúa como carga distribuida en la losa:

$$q_{pp} = \rho \cdot h$$

Donde:

ρ : densidad normal del pino radiata. Este parámetro se obtuvo de la norma NCh1198 anexo E.

$$\rho = 476 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

h : espesor de la losa (mm).

b) Sobrecarga

Esta carga corresponde a la sobrecarga permanente de uso, la cual se obtiene de la norma NCh1537 tabla 4. Para el caso de pisos y viviendas en áreas de uso general, la sobrecarga es:

$$q_{sc} = 200 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

De este modo, la combinación de cargas gravitatorias que se aplicarán a las losas serán:

$$q_{total} = q_{pp} + 0.25 \cdot q_{sc}$$

En los anexos A se indica el cálculo de cada una de las cargas gravitacionales para los diferentes modelos de diafragma.

c) Cargas laterales

Las cargas laterales a las que se sometieron las losas se considerarán como cargas externas. Estas cargas son bastante exageradas respecto de lo que sería un caso real de carga sísmica o viento. El análisis de carga lateral se realizará de forma incremental registrando las deformaciones laterales máximas que se producen en el centro de los diafragmas y el desplazamiento de las conexiones de corte entre paneles. El incremento de carga lateral a analizar va desde los 20 a los 200 kN/m, con incrementos de 20 kN/m en cada análisis lo cual da un total de 10 ensayos de carga.



3.6. Conclusión

Los diafragmas a modelar presentan variantes de razón de aspecto, luz libre, ancho de panel y el tipo de sistema de conexión entre panel. Se definieron las propiedades materiales en relación a las propiedades mecánicas de la madera utilizada en Chile y haciendo uso de ecuaciones dadas por las normas de diseño o de estudios anteriores. El espaciado de los paneles se realizó para 20 mm. De acuerdo a la normativa chilena NCh 1198 se definieron los casos de carga involucrados en las losas CLT.



Capítulo 4 SISTEMAS DE CONEXIÓN ENTRE PANELES

4.1. Introducción

En esta sección se entregará información acerca de los sistemas de conexión utilizados comúnmente para la unión en el plano de elementos CLT, junto con los sistemas utilizados en los modelos de SAP2000. Entre ellas, se distinguen Internal Spline, Surface Spline, Half-Lap y Butt-Joint. Estas conexiones, transmiten las fuerzas de corte en el plano y contribuyen a mantener la integridad de los diafragmas, entregando a la estructura la mayor parte de la disipación de energía sísmica.

4.2. Tipos de Uniones

Las fuerzas de corte en el plano tanto en diafragmas de marco ligero como en diafragmas CLT son resistidas por conexiones de acero, como clavos y tornillos, y estos son los que proporcionan la mayor parte de la disipación de energía en el diafragma durante un evento sísmico. Bajo cargas laterales, el rendimiento de pisos o paredes está controlado por conexiones de acero dúctiles, dado que los paneles CLT por sí mismos son significativamente más rígidos. Por lo tanto, es correcto pensar que las características de la conexión a utilizar van a influir directamente sobre el comportamiento del diafragma, más precisamente, de estos es que dependerá si el diafragma CLT es rígido o no.

En pisos que actúan como diafragmas, las conexiones deben diseñarse para transmitir fuerzas de corte en el plano y mantener la integridad de los diafragmas. Algunas de las posibles conexiones que se utilizan comúnmente en el plano de pisos o paredes son la *unión de ranura interna*, *unión de ranura de superficie simple*, *unión de ranura de superficie doble*, *unión de media vuelta* y *unión de junta a tope* (Anexo B). Las conexiones de ranura interna, tienen una alta resistencia lateral dado que los sujetadores se cargan en cizallamiento doble, presentando también otras ventajas relacionadas con la resistencia a fuerzas normales al plano y fuera del plano. Las conexiones de ranura de superficie simple, son conexiones de fácil instalación en sitio, las que presentan una resistencia lateral inferior a la de conexiones de ranura interna dado que los sujetadores trabajan en corte simple. Las conexiones de superficie de ranura doble, son similares a la anterior, excepto que en estas se incorpora una segunda ranura en la cara opuesta de los paneles para aumentar la resistencia y rigidez la conexión. Lo anterior, se debe a que, al utilizar dos juegos de sujetadores, se duplica el número de planos de corte que resisten la carga lo que da como resultado una mayor resistencia de la conexión. Sin embargo, es una conexión que demanda más mecanismo y tiempo de montaje. Las conexiones de media vuelta, pueden resistir el corte en el plano y la acción de fuerzas normales, pero no se considera que sea una conexiones capaz de resistir al momento (Augustin M. , 2008) Si bien se trata de una conexión muy simple de montaje



rápido, existe el riesgo de que la sección transversal se parta debido a la concentración de tensiones perpendiculares a las tensiones del grano en la zona con muescas. Las conexiones de juntas a tope, son las que presentan los mayores valores de resistencia al corte gracias a la instalación de los tornillos en 45 grados. La principal ventaja de utilizar este tipo de conexión, es que no se requiere un mecanizado costoso de los paneles CLT.

4.3. Uniones Utilizadas en los Modelos

Los sistemas de conexión que se utilizaron en los modelos de diafragmas fueron dos, Surface Spline y Butt-Joint. El modelado de estas conexiones se hizo a través del software SAP2000, las que se definieron como uniones tipo *Link MultiLinear Elástico*. Estos elementos tienen la función de controlar el desplazamiento relativo entre paneles. Para ello, se indican propiedades no lineales en la dirección de desplazamiento de los paneles y propiedades lineales en la dirección transversal.

Los parámetros de cada conexión utilizada en los modelos son principalmente la rigidez por conector y la curva envolvente de cada tipo de conexión. Dichos parámetros, fueron extraídas de los resultados obtenidos de los ensayos monotónicos y cíclicos realizados por Sullivan y col. (2018), donde se ensayaron conexiones *Surface Spline* utilizando tornillos de 10 milímetros; y de los resultados obtenidos por Danzig y col. (2014), donde se ensayaron conexiones *Butt Joint* utilizando tornillos de 8 milímetros instalados a 45 grados. Las rigideces de cada conexión se indican en la Tabla 4.3.1

| Conexión | k_s [kN/mm) |
|----------------|---------------|
| Surface Spline | 0.71 |
| Butt Joint | 6 |

Tabla 4.3.1 Rigideces uniones de corte entre paneles.

Las curvas envolventes de las conexiones modeladas se ajustaron para el caso actual de estudio a partir de las histéresis obtenidos en los resultados de Sullivan y col. (2018), específicamente de los resultados obtenidos en el ensayo #7 donde se utilizaron conexiones Surface Spline, junto con los resultados obtenidos por Danzig y col. (2014) donde el tipo de conexión utilizada fue Butt-Joint. El ajuste consistió básicamente en tomar una serie de puntos característicos de las histéresis obtenidas en las pruebas realizadas por los estudios mencionados, y se dividió el valor de rigidez en esos puntos por la cantidad total de conectores considerados en los respectivos modelos ensayados. Los ajustes son los siguientes:

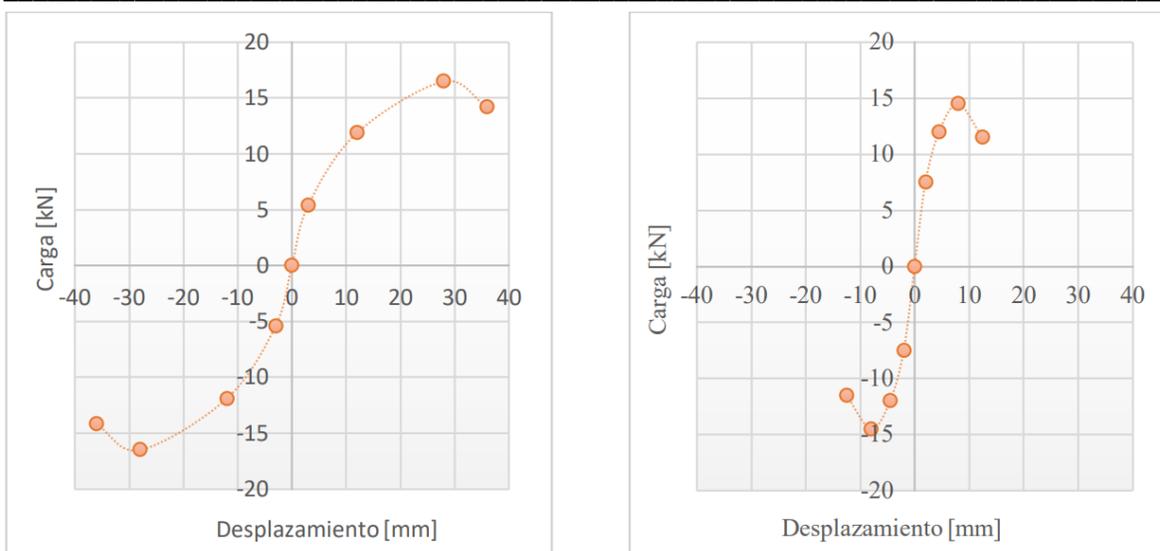


Figura 4.3.1 Ajuste curva envolvente: a) conexión Surface Spline ; b) conexión Butt Joint.

Se indicó, además, una unión tipo Gap con propiedades no lineales en la dirección transversal de los paneles. Es objetivo de esta última es controlar o restringir el choque y separación entre paneles. Estas se definieron con una rigidez igual a 10 veces la rigidez de los elementos Link MultiLinear Elástico, a fin de no tener problemas de convergencia en caso de que se definieran rigideces demasiado grandes.

4.3. Diseño unión Panel-Panel

Como base para el diseño de las conexiones se utilizarán las conexiones Surface Spline, con propiedades de los sujetadores según lo descrito por Sullivan y col. (2018). Se analizará como modelo inicial un diafragma de sección rectangular ($L/B=2$) con luz libre de 3 m y ancho de panel 1.2 m. El límite de relación de aspecto del diafragma es de 4.0 para CLT con juntas estriadas de madera contrachapada, según lo indicado en la Tabla B.1.2.1 para diafragmas de paneles estructurales de madera bloqueada.

Las cargas de diseño a utilizar en este caso serán las cargas externas sobre las cuales se quiere analizar el nivel de resistencia y rigidez del diafragma. De estas cargas laterales externas, se tomará la más desfavorable, esta es:

$$Q_{lat} = 200 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

La carga de corte en una junta es la siguiente:



$$V_{eq} = Q_{lat} \cdot \left(\frac{L}{2}\right)$$

Donde:

L : dimensión del diafragma perpendicular a la aplicación de la carga (m).

Q_{lat} : carga lateral solicitante (kN/m).

La carga de corte distribuida a lo largo del panel es:

$$v_{eq} = \frac{V_{eq}}{B}$$

El nivel de carga de diseño bajo el método ASD considera un factor de seguridad del 70% de la carga total. En este sentido, la carga de diseño es:

$$v_d = 0.7 \cdot v_{eq}$$

La tensión de corte admisible de la madera se obtuvo de la Nch1189 para pino radiata seco de grado C24 con 12% de humedad (Tabla B.1.2.2) (Anexo B). La capacidad de corte admisible de la madera CLT C24 en el plano de corte de la conexión es:

$$V_r = 1.1 [MPa] \cdot \frac{L}{2}$$

Reemplazando los parámetros anteriores, se tiene que la carga de diseño y la capacidad de corte admisible son:

$$v_d = 140 \left[\frac{kN}{m}\right] \quad ; \quad V_r = 3300 \left[\frac{kN}{m}\right]$$

Por lo tanto, como $V_r > v_d$, la carga de diseño está dentro del rango de carga admisible de la madera CLT. El valor obtenido de la carga admisible es bastante mayor a la carga de diseño, lo cual tiene sentido dado que la capacidad de corte en el plano del panel CLT (V_r), generalmente es grande en comparación con la capacidad al corte de las conexiones panel-panel.

Como se mencionó con anterioridad, los sujetadores utilizados en los modelos son los utilizados en el estudio realizado por Sullivan y col. (2018). Estos sujetadores son tornillos parcialmente roscados de 10x100 mm (Figura B.1.2.1) (Anexo B.1.2). La penetración real del tornillo en la madera contralaminada es:

$$l_m = l - l_s$$

Donde:

l : longitud del tornillo; $l = 100 [mm]$.

l_s : espesor de la madera contrachapada; $l_s = 1 [in] = 25.4 [mm]$.



Así, la penetración real del tornillo en la madera contralaminada es:

$$l_m = 74.6 [mm]$$

Los valores mínimos de separación y penetración de los tornillos en su instalación se calculan como $5d$ y $6d$, respectivamente, donde “d” corresponden al diámetro del tornillo. Así, al reemplazar el valor del diámetro, la separación y penetración mínima de los tornillos es:

$$s_{mín} = 5d = 50 [mm]$$

$$p_{mín} = 6d = 60 [mm]$$

El factor de duración de carga (C_D) se determinó de acuerdo con la NDS-2015, Tabla 2.3.2, que entrega los valores de factor de duración de carga de uso frecuente. Para el caso particular que se está analizando, la carga lateral correspondería a un escenario de carga lateral por viento o por evento sísmico. En este sentido, el factor C_D es igual a 1.6.

La NDS-2015, sección 12.3.1, entrega información útil para la determinación de los Valores de Referencia para el Diseño Lateral (Z) para corte simple y doble corte simétrico. Las ecuaciones de rendimiento límite permiten calcular el parámetro Z para los distintos modos de falla (Tabla B.1.2.3) (Anexo B).

En este caso, la capacidad de corte del sujetador se rige por el límite elástico a la flexión de tornillo en el larguero. El modo de falla asociado es el modo IIIs (Tabla B.1.2.2) (Anexo B). Dado esto, considerando además que la conexión analizada trabaja a corte simple, la ecuación a utilizar para determinar el valor Z es la ecuación 12.3-5 de la Tabla B.1.2.3; esto es:

$$Z = \frac{k_3 \cdot D \cdot l_s \cdot F_{em}}{(2 + R_e)R_d}$$

Donde:

D : diámetro (mm).

l_s : espesor de la madera contrachapada (mm).

F_{em} : resistencia del pasador del miembro principal (kN/mm).

R_d = término de reducción.

$R_e = F_{em}/F_{es}$

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1+R_e)}{R_e} + \frac{2F_{yb}(2+R_e)D^2}{3F_{em} \cdot l_m^2}}$$

F_{es} : Resistencia del pasador del miembro lateral (kN/mm).

F_{yb} : Límite elástico de flexión del pasador.



Nota: se considerará que el pasador del tornillo se extiende lo suficiente más allá del plano de corte, por lo cual se utilizará el diámetro del pasador para el cálculo de Z' . Esto generará un aumento en Z y, por tanto, un aumento de la capacidad de los tornillos. Así mismo, permitirá tener un espaciado de los tornillos mayor. De este modo, el diámetro D a utilizar corresponde al diámetro del vástago del tornillo (D_v) que corresponde a 7.2 mm.

La resistencia del pasador del miembro lateral y principal se determina según la Tabla 12.3.3 de la NDS (2015), para una gravedad específica de 0.45 recomendada en Chile para paneles de madera de pino radiata con densidad característica de 476 kN/m³. De acuerdo a esto, la resistencia del pasador del miembro lateral y principal es 1900 psi y 5050 psi, respectivamente. El límite elástico en flexión del pasador corresponde a 150200 psi, de acuerdo a la ICC ESR 3179, Tabla 1. De este modo, el término R_e es:

$$R_e = 2.66$$

Cuando el modo de falla del conector corresponde a los modos III_m, III_s o IV, el término de reducción R_d se determina como $3.2K_\theta$.

$$K_\theta = 1 + 0.25(\theta/90)$$

Donde:

θ : máximo ángulo entre la dirección de carga y la dirección del grano para cualquier miembro en la conexión ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$).

Dado que $\theta = 0$, el término K_θ es igual a 1, lo cual deja un factor de reducción R_d igual a 3.2.

Luego, Si se sustituyen todos los parámetros determinados sobre la expresión del término k_3 , se tiene que el parámetro k_3 es:

$$k_3 = 0.901$$

De este modo, el valor de referencia para el diseño lateral Z es:

$$Z = 0.385 [kN]$$

Luego, se debe aplicar el factor de duración de carga al valor de referencia de diseño lateral. De este modo se tiene un nuevo parámetro Z' que se calcula de la siguiente manera:

$$Z' = Z \cdot C_D$$

Así, Z' es:

$$Z' = 0.616 [kN]$$

Finalmente, el espaciado requerido para las conexiones entre paneles está dado por:

$$l_{requerido} = \frac{Z' \cdot b_p}{v_d}$$



Nota: el ancho de panel b_p en esta ecuación se debe ingresar en pulgadas. El ancho de panel es de 1.2 m (47.244 in).

Así, el espaciado requerido es:

$$l_{requerido} = 20.7 [cm]$$

El espaciado mínimo requerido (s_d) era de 50 mm. De este modo, el espaciado a utilizar para las conexiones de corte entre panel será de 20 cm en cada modelo.

4.4. Conclusión

Uno de los factores importantes al momento de elegir del sistema de conexión a utilizar, es la facilidad de montaje en terreno. Los sistemas de conexión *Surface Spline*, si bien son los que presentan los niveles más bajos de rigidez al corte, son preferidos por los diseñadores debido a su facilidad de montaje. La instalación de tornillos en 45 grados mejora de manera considerable la resistencia al corte de la conexión. El modelado de las uniones en Sap2000 se realizó por medio de uniones tipo Link MultiLinear Elástico, mientras que el choque y separación de los paneles de controló con uniones tipo Gap.



Capítulo 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de carga lateral al que fueron sometidos los diafragmas de piso de CLT. El parámetro fundamental a analizar es la deflexión total del diafragma producto del desplazamiento de las conexiones de corte y la deformación de los paneles, evaluando para qué niveles de carga los diafragmas presentan un comportamiento rígido bajo los criterios del Eurocódigo y la norma ASCE7-16, entregando finalmente un análisis comparativo de los valores de deflexión obtenidos a través de los modelos numéricos versus los valores de deflexión obtenidos con la fórmula analítica.

5.2. Desplazamiento del diafragma

El desplazamiento del diafragma fue medido en el centro de este en la dimensión perpendicular a la carga aplicada a fin de observar el desplazamiento relativo entre paneles, que es uno de los mecanismos en diafragmas CLT que ocurre cuando el corte se distribuye a lo largo de las conexiones entre paneles.

Se midió el desplazamiento de las conexiones de corte entre paneles y se calculó de manera teórica la deflexión del diafragma, para luego, comparar los resultados de deflexión obtenidos a través de los modelos numéricos de SAP2000 con los resultados teóricos de deflexión calculados mediante la fórmula de la SDPWS-2015 de desplazamiento máximo en diafragmas de madera.

5.3. Modelos de SAP2000

Los modelos de diafragma comprenden el diseño de paneles CLT que componen la losa, conectados entre sí mediante conexiones de corte. En los bordes de los diafragmas se definieron apoyos fijos y móviles permitiendo el desplazamiento entre paneles centrales a excepción de los paneles de los bordes los cuales permanecen fijos. Los modelos no contemplan elementos de cuerda, por lo cual, la verificación del desplazamiento máximo del diafragma (δ_{MDD}) se realizará solo con las componentes de deflexión aportados por el corte en los paneles y por el desplazamiento de las conexiones de corte.

Los patrones de desplazamiento de los diafragmas producto de la carga lateral se asemejan al mecanismo a) con cortante distribuida a lo largo de las conexiones (Figura 2.5.1), en cuyo caso el desplazamiento máximo del diafragma ocurre en el centro de este. La Figura 5.3.1



muestra el desplazamiento del diafragma del modelo de sección rectangular, con luz libre de 3 m, paneles de 1.2 m y conexiones Surface Spline.

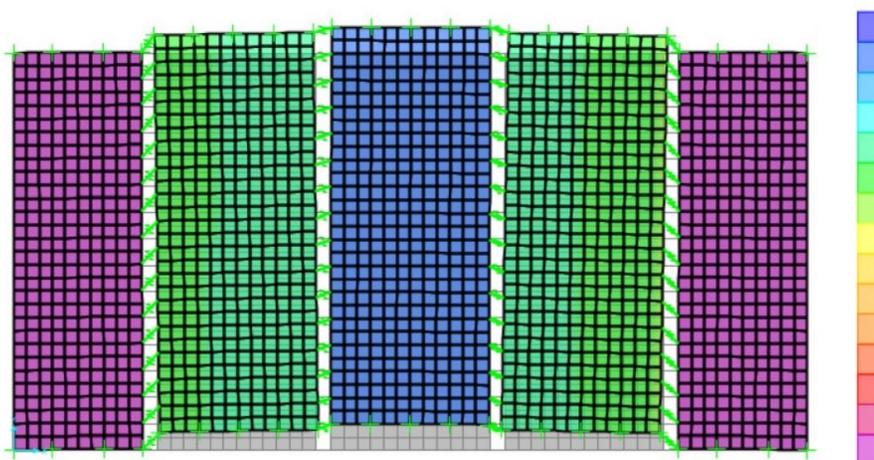


Figura 5.3.1 Desplazamiento del diafragma CLT dirección Y (mm).

La deformada del diafragma de todos los modelos presenta una deformada bajo el mismo mecanismo, variando los niveles de deflexión total. Se observó que la configuración de diafragma con los niveles de deflexión más altos es el diafragma con paneles CLT de 2.4 m y conexiones SS en los resultados teóricos, y el diafragma con paneles de 1.2 m y conexiones SS en los resultados numéricos. Esta diferencia se debe a que la fórmula de deflexión entrega un factor de importancia mayor a la deformación por corte de las conexiones entre paneles, manteniendo relativamente constantes las deformaciones por corte de los paneles que en sí son mucho más rígidos

5.4. Rigidez, resistencia y ductilidad

5.4.1 Rigidez del diafragma

Desde el punto de vista de la rigidez de cada uno de los modelos de diafragma analizados, los resultados obtenidos se indican en la Figura 5.4.1. Estos indican que las configuraciones de diafragma que presentaron los mayores niveles de rigidez fueron las secciones cuadradas de diafragma CLT, las que fueron disminuyendo a medida que se aumentó la razón de aspecto del diafragma a rectangular y alargada, respectivamente.

Por otro lado, se observó que otro parámetro que influyó en el aumento de la rigidez de las diferentes configuraciones, fue el aumento del tamaño del panel. Al aumentar el largo y ancho del panel, se obtienen aumentos en la rigidez del diafragma. Del mismo modo, como



era de esperar, los sistemas con conexiones Butt Joint fueran más rígidos en comparación a los sistemas con conexiones Surface Spline, debido a las propiedades de la conexión de corte.

En este sentido, la configuración de diafragma más rígida, fue el diafragma de sección cuadrada de la variante 4, con luz libre de 6m, conexiones Butt Joint y paneles de 2.4m. Por el contrario, la configuración de diafragma menos rígida, fue el diafragma de sección alargada de la variante 1, con luz libre de 3m, conexiones Surface Spline y paneles de 1.2m

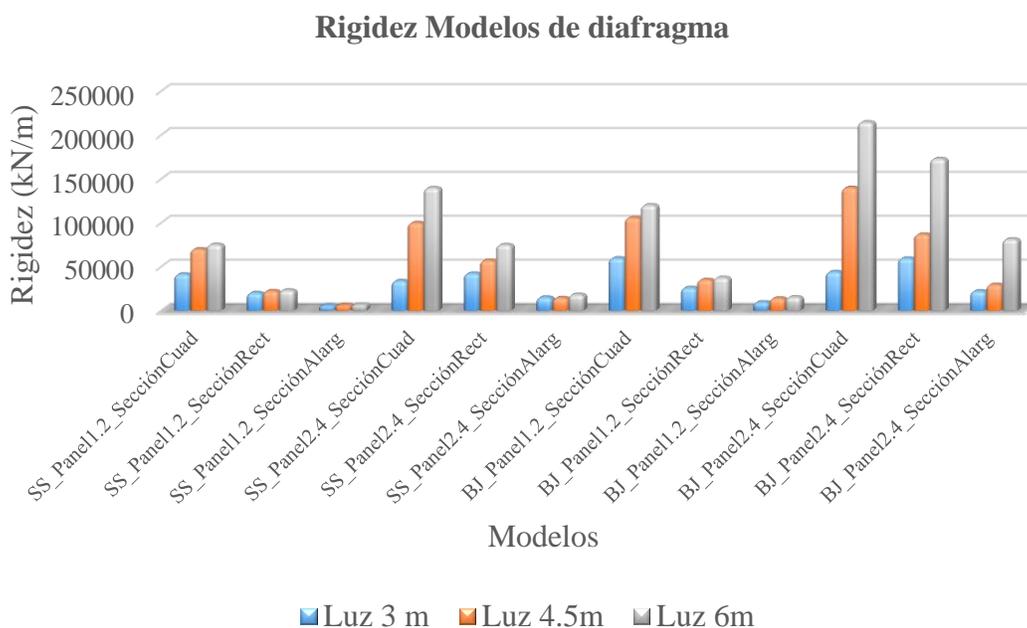


Figura 5.4.1 Rigidez modelos de diafragma CLT

5.4.2 Resistencia del diafragma

Los resultados de resistencia obtenidos en las diferentes configuraciones de diafragma se indican en la Figura 5.4.2. De estos resultados es posible observar que, al igual que la rigidez, los modelos de diafragma que presentaron los mayores valores de resistencia fueron los diafragmas de sección cuadrada, lo cual fue disminuyendo a medida que se aumentaba la sección del diafragma a rectangular y alargada, respectivamente.

De igual modo, al aumentar el tamaño del panel CLT en ancho y largo, se observan aumentos en la resistencia de los diafragmas. El uso de conexiones Butt Joint genera disminuciones en la resistencia del diafragma, siendo los sistemas con conexiones Surface Spline los que presentaron los valores de resistencia más elevados.



Así, la configuración de diafragma que presentó el mayor valor de resistencia fue el diafragma de sección cuadrada de la variante 2, con luz libre de 6m, conexiones SS y paneles de 2.4m

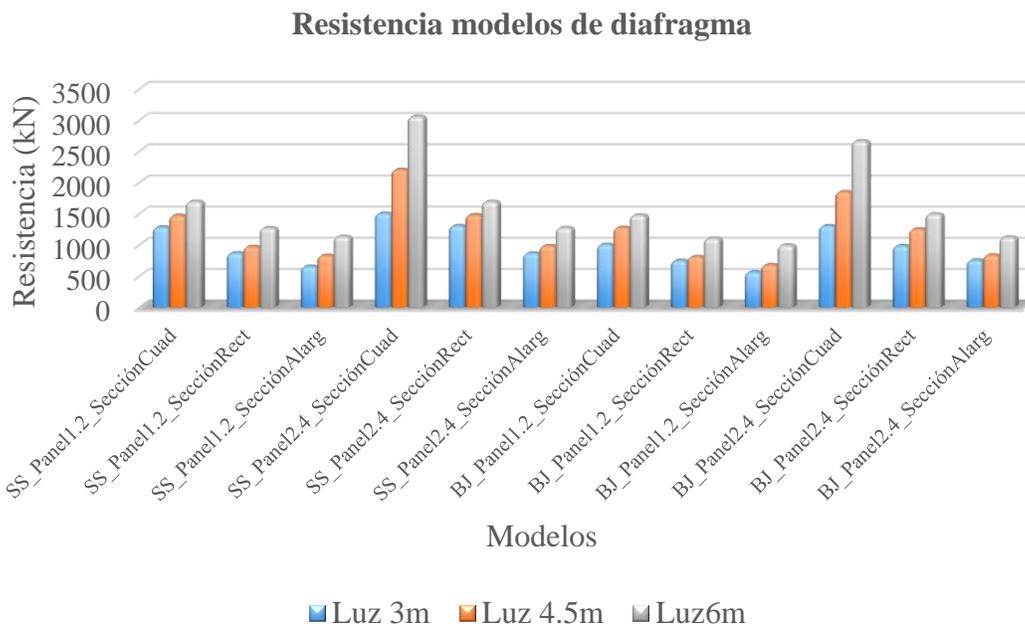


Figura 5.4.2 Resistencia modelos de diafragma CLT

5.4.3 Ductilidad del diafragma

Los resultados de ductilidad obtenidos para los diferentes modelos de diafragma se indican en la Figura 5.4.3. Estos resultados indican que las configuraciones diafragma que presentan las mayores ductilidades son los diafragmas de sección cuadrada.

Por otro lado, se observa que, al aumentar el tamaño del panel tanto en largo como en ancho, disminuye la ductilidad de los diafragmas. Así mismo, el uso de conexiones BJ genera disminuciones muy considerables en la ductilidad de los diafragmas.

El modelo de diafragma que presenta el mayor valor e ductilidad es el diafragma de sección cuadrada de la variante 1, con luz libre de 3m, conexiones SS y paneles de 1.2m.

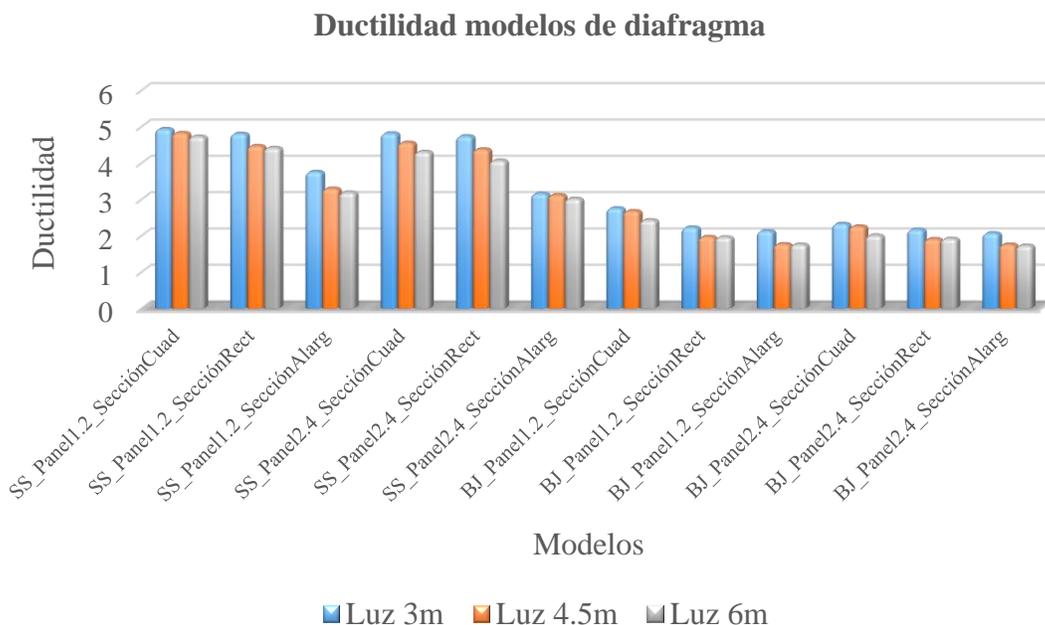


Figura 5.4.3 Ductilidad modelos de diafragma CLT

5.5. Deformación del diafragma

La deformación del diafragma se analizó para cargas laterales distribuidas que fueron desde los 20 hasta los 200 kN/m. Estas cargas permitieron determinar, para los diafragmas analizados, el punto hasta el cual estos presentan un comportamiento rígido bajo los criterios de deflexión del Eurocódigo y la norma ASCE7-16, que clasifican este comportamiento en términos del índice de Flexibilidad. Estas normas, además, determinan el desplazamiento promedio de los elementos verticales como 1.1Δ y 2Δ , respectivamente (Δ : drift de entre piso). Para la verificación, se consideró un drift del 0.2% y una altura de entre piso de 2.5 m. En este sentido, el desplazamiento promedio de los elementos verticales bajo el Eurocódigo y la norma ASCE7-16 son 5.5 y 10 mm, respectivamente. Por otra parte, dado que los modelos de SAP2000 no contemplan elementos de cuerda, se considerará un factor de reducción aplicable al desplazamiento máximo del diafragma del 60%, que es lo que se considera que es el aporte total de la deflexión por corte de los paneles y la deflexión de las conexiones de corte. Así, para un IF igual 2, los desplazamientos máximos del diafragma para los cuales este deja de tener un comportamiento rígido son 6.6 y 12 mm, bajo el Eurocódigo y la norma ASCE7-10, respectivamente.

Los resultados de deflexión se clasificaron en las variantes 1, 2, 3 y 4. Además, se agruparon en gráficos en función de la luz libre. Los resultados de deflexión obtenidos con la fórmula analítica en los modelos con luz libre de 3 m (Figura 5.4.4), indican que los diafragmas de



sección cuadrada presentan un comportamiento rígido para todos los niveles de carga lateral bajo ambas normativas los modelos con ambos tipos de conexión de corte y para ambos anchos de panel. La configuración que presenta los menores valores de deflexión es la configuración de diafragma con conexiones BJ y paneles de 1.2 m. Los diafragmas de sección rectangular comienzan a presentar aumentos en los valores de deflexión, generando que ahora los diafragmas pierdan su comportamiento rígido para cargas que superan los 40 kN/m bajo el Eurocódigo, y para cargas en torno a los 80 kN/m aproximadamente bajo la norma ASCE7. Los diafragmas de sección alargada son los más desfavorables en términos de deflexión pues presentan los valores más elevados. Los resultados muestran que estos modelos de diafragma presentan un comportamiento flexible para todos los casos de carga lateral bajo ambas normativas de desempeño.

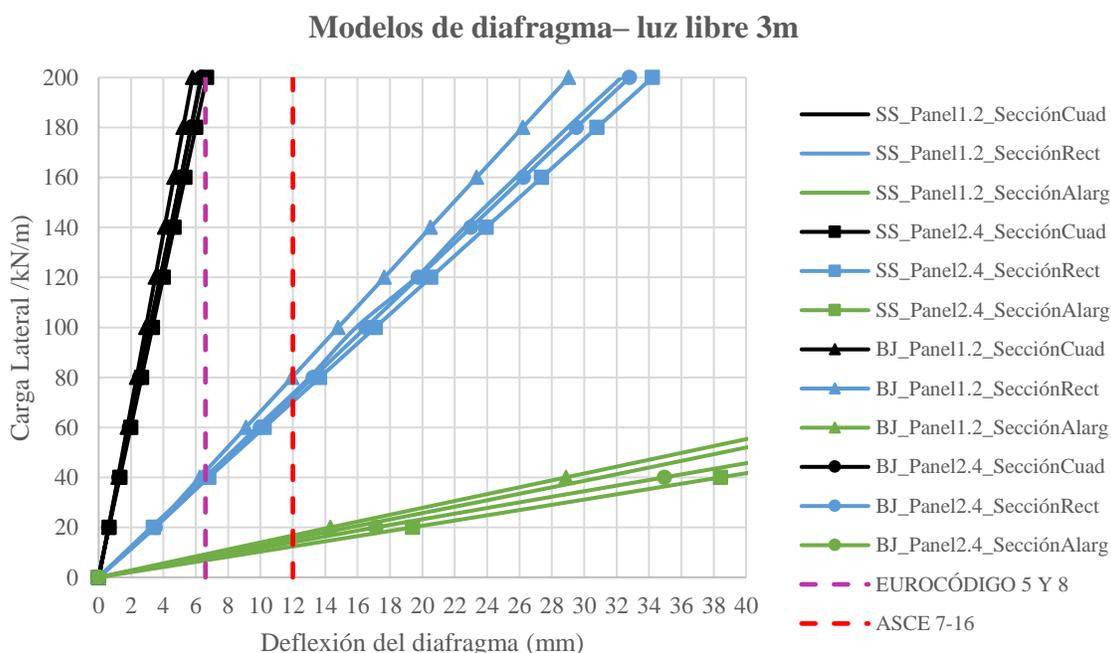


Figura 5.4.4 Deflexiones teóricas diafragmas CLT con luz libre de 3m.

Respecto de los resultados obtenidos a través de los modelos numéricos, se obtuvo que en general la variación de los valores de deflexión fue una disminución respecto de los valores teóricos de deflexión. En el primer caso analizado correspondiente a los modelos de diafragma con luz libre de 3 metros, los resultados de los modelos numéricos de sección cuadrada presentaron una disminución del 6.1% en la deflexión del diafragma, los modelos de sección rectangular presentaron una disminución del 62.1% y finalmente los modelos de sección alargada presentaron una disminución del 76.5%. En este sentido, los resultados teóricos de deflexión respecto de los resultados analíticos, están en razón de 2.7 en los



diafragmas con luz libre de 3. Los resultados numéricos de deflexión del diafragma de los modelos con luz libre de 3 m obtenidos a través de los modelos de SAP2000 se indican en la figura a continuación.

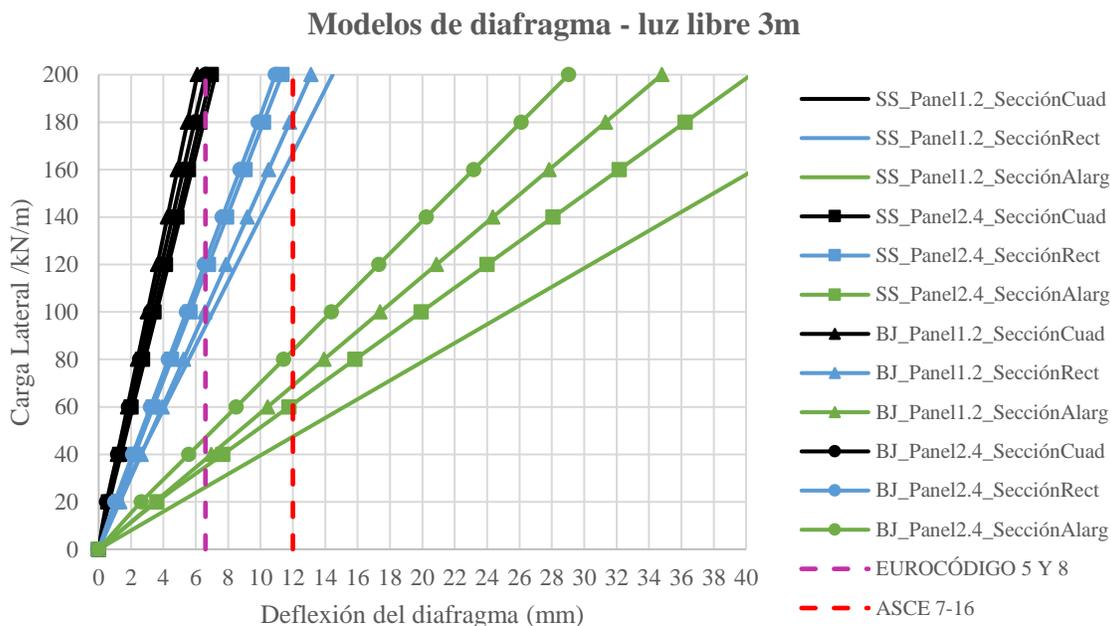


Figura 5.4.5 Deflexiones numéricas diafragmas CLT con luz libre de 3m.

El aumento de luz libre, genera aumentos en la deflexión total del diafragma, lo cual se debe principalmente a aumentos del desplazamiento de las conexiones entre paneles. Esto genera que la carga que pueden resistir los modelos de diafragmas manteniendo su comportamiento rígido, sea menor en comparación a los modelos con luz libre de 3 m.

El siguiente caso a analizar es el de los modelos de diafragmas con luz libre de 4.5 m. Según los resultados obtenidos a través de la fórmula analítica de la SDPWS (Figura 5.4.8), a diferencia del caso anterior, los diafragmas de sección cuadrada no permanecen rígidos para todos los niveles de carga lateral. De estos, el diafragma más rígido es el diafragma de la variante 3 que utiliza conexiones BJ y paneles de 1.2 m, que pierde su comportamiento rígido para cargas por sobre los 180 kN/m bajo el Eurocódigo. El diafragma que pierde antes su comportamiento rígido es el diafragma de la variante 2 con conexiones SS y paneles de 2.4 m, que pierde su comportamiento rígido para cargas por sobre los 140 kN/m. Los diafragmas de sección rectangular presentan aumentos en los valores de deflexión, generando que ahora los diafragmas tienen comportamiento rígido solo para el primer caso de carga lateral de 20 kN/m bajo el Eurocódigo, y para cargas en torno a los 50 kN/m bajo la norma ASCE7. Los



diafragmas de sección alargada presentan un comportamiento flexible para todos los casos de carga lateral analizados.

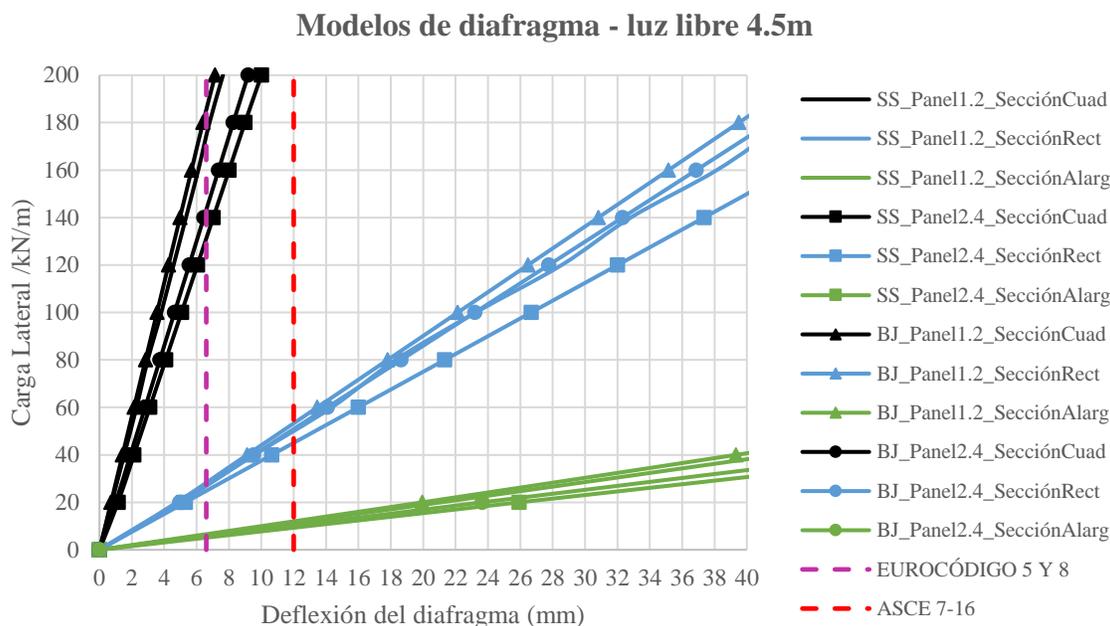


Figura 5.4.6 Deflexiones teóricas diafragmas CLT con luz libre de 4.5m.

Respecto de los resultados de deflexión obtenidos a través de los modelos numéricos para este caso de análisis con luces libres de 4.5m (Figura 5.4.7), se tuvo que la variación de estos respecto de los valores teóricos de deflexión obtenidos con la fórmula analítica, fueron un 18.3% menores en los modelos de sección cuadrada, 68.9% menores en los modelos de sección rectangular y 76.8% menores en los modelos de sección alargada. A medida que se aumenta la sección como ocurre en el caso anterior, tiende a aumentar la diferencia entre los resultados teóricos y numéricos de deflexión del diafragma. Por otro lado, según lo observado, los resultados teóricos de deflexión respecto de los resultados analíticos de deflexión, estuvieron en razón de 3.2 en estos modelos de diafragma con luz libre de 4.5 m.

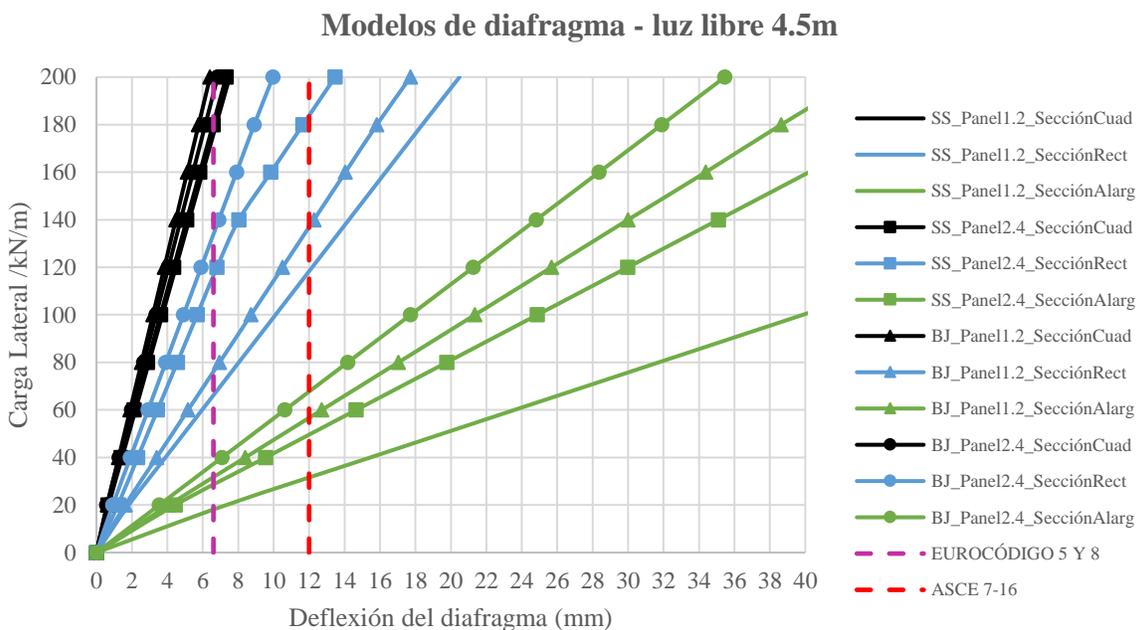


Figura 5.4.7 Deflexiones numéricas diafragmas CLT con luz libre de 4.5m.

El siguiente caso a analizar es el de los modelos con luces libres de 6m. En relación a los resultados obtenidos, se concluye que los mayores valores de deflexión del diafragma se obtuvieron en este caso de análisis con luz libre de 6m (Figura 5.4.8).

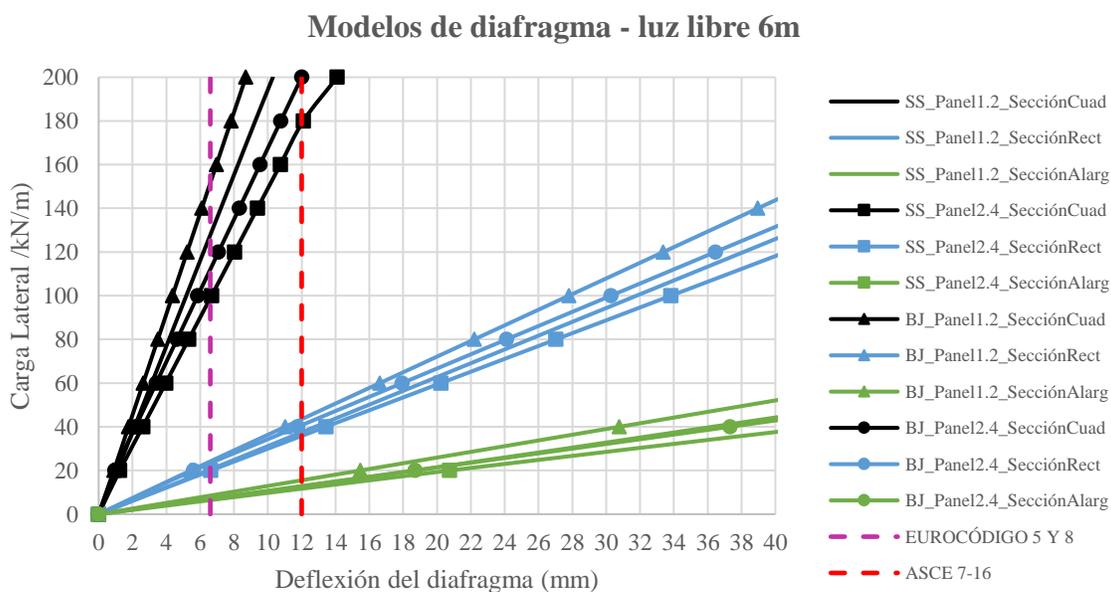


Figura 5.4.8 Deflexiones teóricas diafragmas CLT con luz libre de 6m.



Tanto las secciones cuadradas como rectangulares y alargadas, reflejaron aumentos en la flexibilidad del diafragma, generando que ahora los niveles de carga lateral necesarios para hacer que el diafragma pierda su comportamiento rígido sean mucho menores. El diafragma de sección cuadrada que presentó la menor deflexión lateral fue el modelo de la variante 3 con paneles de 1.2 m y conexiones BJ, el cual mantiene un comportamiento rígido para cargas menores a los 150 kN/m bajo el Eurocódigo, siendo rígido para todos los casos de carga bajo la norma ASCE7. Así mismo, el que presentó la mayor deflexión lateral fue el modelo de la variante 2 con paneles de 2.4 m y conexiones SS, que presenta comportamiento rígido para cargas laterales hasta los 100 kN/m bajo el Eurocódigo y para cargas hasta los 180 kN/m bajo la norma ASCE7. Este resultado es esperable debido a la mayor rigidez que aporta al sistema la conexiones BJ en comparación al sistema de conexión SS. Así mismo, el aumento del ancho del panel CLT genera que haya una menor cantidad de líneas de conexión a lo largo del diafragma, por lo cual la misma carga de antes deberá distribuirse en una menor cantidad de conectores lo cual provoca un aumento en la deflexión por deslizamiento de las conexiones de corte.

Si bien los diafragmas de sección rectangular aumentaron sus niveles de deflexión, estos fueron mucho menores en comparación a los aumentos registrados en las secciones cuadradas de diafragma. Ahora, para estas configuraciones de diafragma, los modelos de sección rectangular presentan un comportamiento rígido para cargas no mayores a los 20 kN/m bajo el Eurocódigo y para cargas en torno a los 40 kN/m bajo la norma ASCE7. Lo mismo ocurre con los modelos de sección alargada, los que no cumplen los requerimientos de diafragma rígido para ninguno de los niveles de carga lateral analizados, lo cual implica que estos tienen un comportamiento flexible en todos los casos bajo ambas normativas.

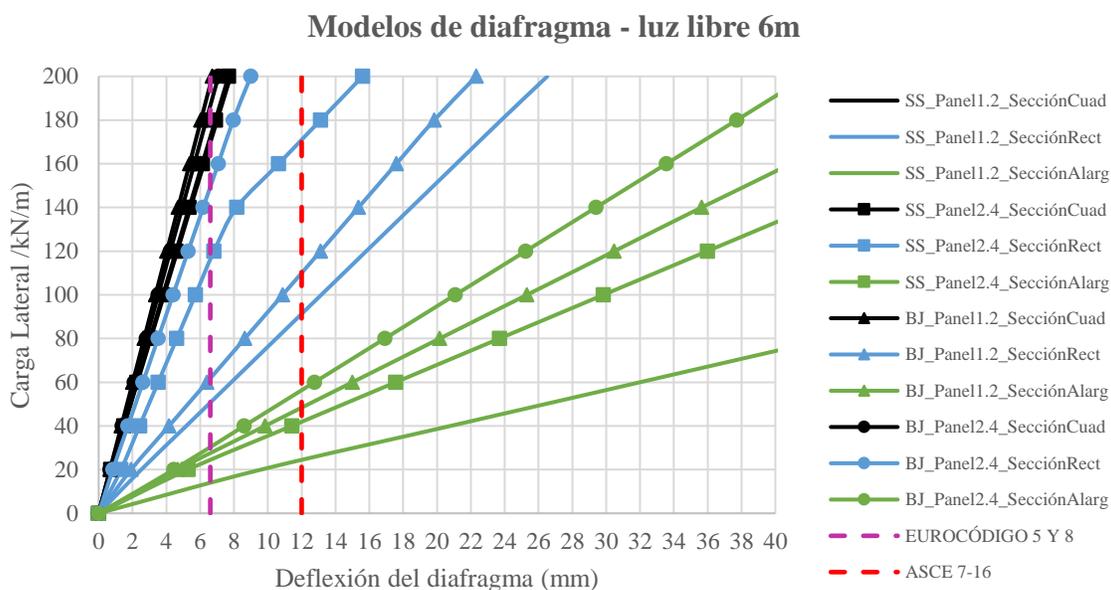


Figura 5.4.9 Deflexiones numéricas diafragmas CLT con luz libre de 6m.



Respecto de los resultados numéricos de deflexión para el caso de diafragmas con luces libres de 6m (Figura 5.4.9), se tuvo que la variación de estos resultados respecto de los valores teóricos de deflexión, fueron de un 32.9% menores en los modelos de sección cuadrada, 72.0% menores en los modelos de sección rectangular y 66.9% menores en los modelos de sección alargada.

5.6. Conclusión

El patrón de resultados del análisis teórico de deflexión estuvo controlado por el desplazamiento de las conexiones de corte entre paneles, que presenta valores de deflexión mucho mayores a medida que aumentaba la sección del diafragma en comparación con la deflexión por corte de los paneles CLT.

La ecuación definida por la norma SDPWS para el cálculo del desplazamiento máximo de diafragmas de madera (δ_{MDD}) es válida para el rango lineal de deformación del diafragma. Los resultados de δ_{MDD} obtenidos teóricamente difieren bastante en comparación a los valores de deflexión numéricos obtenidos mediante los modelos no lineales. En general, los valores de deflexión obtenidos de manera analítica con la fórmula de la SPDWS son mayores a los valores de deflexión numéricos, lo cual tiene sentido pues las fórmulas analíticas permiten diseñar de forma más segura incluyendo implícitamente factores de seguridad al sistema.

La flexibilidad del diafragma tiende a aumentar a medida que se aumenta la sección del mismo. Esto puede ser útil para ciertos casos donde se desee disminuir la demanda sobre el elemento, pero para el caso analizado el aumento de la flexibilidad de los diafragmas genera que estos pierdan su comportamiento rígido. Los diafragmas que presentan comportamiento rígido en la mayor parte de los niveles de carga analizados son los diafragmas de sección cuadrada, los cuales fueron perdiendo rigidez al aumentar el parámetro de luz libre. Los modelos de sección alargada presentan comportamiento flexible en la mayor parte de niveles de carga analizados, permaneciendo rígidos solo para el primer caso de carga analizado.



Capítulo 6 CONCLUSIONES

Esta investigación evaluó el comportamiento rígido de diafragmas de piso de madera contralaminada bajo cargas laterales. Para ello se elaboraron distintos modelos de diafragma que presentaron variaciones en el sistema de conexión entre panel utilizado, ancho de panel, luz libre y razón de aspecto del diafragma.

A partir del análisis de modelos no lineales de los diafragmas se pudo identificar el tipo de comportamiento que presentaron los diafragmas horizontales en las diferentes configuraciones estudiadas. Este comportamiento clasificó a los diafragmas de sección cuadrada y luz libre de 3 m como la configuración de diafragma más rígido, mientras que los diafragmas de sección alargada fueron los que presentaron un comportamiento flexible en la mayor parte de casos de carga analizados.

Conforme a los resultados obtenidos, se puede concluir que se aprueba parcialmente la hipótesis de investigación mayormente en diafragmas de sección cuadrada, los que presentan un comportamiento rígido casi en la totalidad de casos analizados, teniendo en cuenta además lo exagerado de las cargas laterales inducidas. Los diafragmas de sección rectangular presentan comportamiento rígido para el 40 y 60% de los casos de carga lateral. Los diafragmas de sección alargada fueron la configuración más desfavorable en términos de deformación, generando que no se cumpliera la hipótesis de diafragma rígido en estos casos dado que estos modelos solo presentaron comportamiento rígido para el 10% de las cargas inducidas.

De los análisis realizados, en base a los resultados se puede comprobar una elevada rigidez, resistencia y ductilidad en los modelos de sección cuadrada, propiedades que disminuyen al aumentar la razón de aspecto del diafragma. En base a esto, se puede comprobar que son los diafragmas de sección cuadrada los que poseen la mayor capacidad de disipación de energía elastoplástica, lo cual implica un mejor comportamiento sísmico de la estructura. Del mismo modo, el aumento del tamaño de los paneles tanto en el ancho como en el largo, genera aumentos de resistencia y rigidez del diafragma, pero se pierde ductilidad.

Respecto de los distintos sistemas de conexión entre panel involucrados en los modelos, los resultados muestran que los diafragmas que utilizaban conexiones Butt Joint son los que poseen la mayor rigidez, pero hay una pérdida de resistencia en relación a las capacidades que presentaron los diafragmas que utilizaran conexiones Surface Spline. Por otro lado, la ductilidad de los diafragmas disminuye considerablemente en los sistemas con conexiones BJ. Dado esto, si bien la rigidez de los diafragmas con conexiones BJ se ve aumentada, no es una configuración de uso recomendable debido a la disminución de sus propiedades de resistencia y ductilidad, que proveen a la estructura de un comportamiento sísmico frágil.

Los resultados de deflexión numéricos fueron menores a los resultados teóricos de deflexión del diafragma, lo cual es lógico pues el análisis teórico permite diseñar de manera más segura



asumiendo que el diafragma posee una menor resistencia. La fórmula propuesta por la SPDWS para el cálculo de la deflexión máxima en diafragmas de madera es válida solo en el rango lineal de deformación del diafragma. Dado esto, considerando que para algunos casos de carga lateral la estructura entra en su rango no lineal de deformación aumentando el error respecto de los resultados numéricos, pudiese ser necesario verificar la deflexión obtenida de manera teórica mediante otro método que se ajuste mejor.

En los modelos de diafragma estudiados, las variables que determinaron el patrón de desplazamiento del diafragma fueron la disposición entrecruzada de los paneles CLT que dotan al sistema de mayor rigidez, y las conexiones de corte entre los paneles del diafragma. Esta última variable es la que entregan la mayor ductilidad al sistema y es la que controla el comportamiento del diafragma.



REFERENCIAS

- 16WCEE. (2017). *DUCTILE CONNECTIONS FOR CROSS-LAMINATED TIMBER*.
- Anirudh Kode, M. O. (2021). *Lateral load testing of a full-scale cross laminated timber diaphragm*.
- ASTM International. (2007). Standard Test Method for Evaluating the Shear Strength of Adhesive Bonds in Laminated Wood Products at Elevated Temperatures. *ASTM D7247*.
- Augustin, M. (2008). *Handbook 1 - Timber Structures. Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures - TEMTIS*.
- Augustin, M. (2008). *Timber structures. Handbook 1 of Educational materials for designing and testing of timber structures - TEMTIS. Leonardo da Vinci Pilot Project*.
- Brandner R, D. P.-W. (2015). Shear Properties of Cross Laminated Timber (CLT) under in-plane load: Test Configuration and Experimental Study. *Proceedings of the 2nd International Network on Timber Engineering Research meeting*.
- Breneman, S. (2016). *Cross-Laminated Timber: Structural Floor and Roof Design*.
- Bruno Dujic, K. S. (2010). *PREDICTION OF DYNAMIC RESPONSE OF A 7-STOREY MASSIVE XLam WOODEN BUILDING TESTED ON A SHAKING TABLE*.
- Canadian Standards Association. (2006). Qualification Code for the Manufacturers of Structural Glued-Laminated Timber. *CSA O177*.
- Canadian Standards Association. (2008). Evaluation of Adhesives for Structural Wood Products (Limited Moisture Exposure). (CSA 0112.10).
- Craft. (2011). *Fire performance of CLT assemblies*. Vancouver, Canada.
- D. Moroder, T. S. (2015). *Design of floor diaphragm in multi-storey timber building*.
- D. Vassallo, I. P. (2013). *Design of a Four-Story Cross Laminated Timber Building in Northern Italy*.



Danzig, H. (2014). *HIGH PERFORMANCE CROSS-LAMINATED-TIMBER SHEAR CONNECTION WITH SELF-TAPPING SCREW ASSEMBLIES*.

Engineering Structures. (2018). Behavior of cross-laminated timber diaphragm connections with self-tapping.

Engineers, A. S. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*.

Evans, L. (2013). Cross Laminated Timber. *reThink Wood, AWC and FPI Innovations*.

FPInnovations. (2013). *CLT Handbook*. Canadian Edition.

FPInnovations. (2019). *Canadian CLT Handbook*. Canada: Volume 1.

Goycoolea, J. (2017). *Diseño de un edificio híbrido con núcleo de hormigón armado*. Concepción.

Hossain, A. (2016). *Cross-Laminated Timber Shear Connections with Double-Angled Self-Tapping Screw Assemblies*.

Kris Spickler, M. C. (2015). *CROSS LAMINATED TIMBER - Horizontal Diaphragm Design Example*.

Lozano, F. (Noviembre de 2017). *Los desafíos para impulsar el uso de madera en construcción*. Obtenido de <http://www.seminarioscorma.cl/wp-content/uploads/2017/11/Presentacion-Francisco-Lozano.pdf>

SPDWS-2015, A. (2015). *SPDWC Special Design Provisions for Wind & Seismic. Edición 2015*.

Structurlam. (2017). *Crosslam CLT Technical Design Guide*.

Sullivan, K. (2018). *Behavior of cross-laminated timber diaphragm connections with self-tapping*.

Universidad Mayor. (2017). *Situación actual de la madera en Chile en el contexto de la construcción en edificación*. Santiago, Chile.



Wallner Novak, J. K. (2013). *Cross Laminated Timber Structural Design - Basic design and engineering principles according to Eurocode.*

Wallner-Novak, M. A. (2018). *Cross-Laminated Timber Structural Design - Voume 2.*

Wiegand. (2011). *Building With Cross Laminated Timber.*

WoodWorks. (2017). *Approach to CLT Diaphragm Modeling for Seismic Desing with Application to a U.S. High-Rise Project.*

Yasumura, M. (2016). *Full-Scale Tests and Numerical Analysis of Low-Rise CLT Structures under Lateral Loading.*

ANEXO A

A.1 DISEÑO DE LOSAS CLT

Los modelos de losas de madera contralaminada que se consideraron en el diseño varían según 4 variantes. Las variantes 1 y 3 consideran losas con paneles de 1.2 m de ancho; las variantes 2 y 4 consideran losas con paneles de 2.4 m de ancho. Además, en cada variante hay una clasificación para los tipos de diafragma según el parámetro de luz libre que permite clasificarlos como diafragmas CLT A, B y C con valores de luz libre de 3 m, 4.5m y 6 m, respectivamente. Los modelos A corresponden a paneles CLT de 3 capas, los modelos B 5 capas y los modelos C 7 capas.

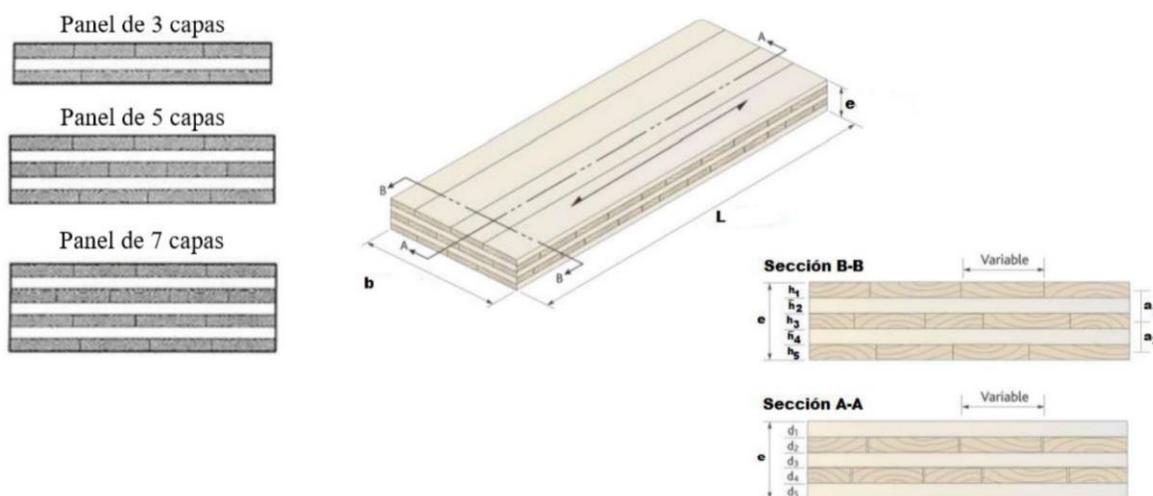


Figura A.1 Vistas paneles CLT.

A.1.1 Módulos de elasticidad

Los módulos de elasticidad de la madera aserrada C24 es igual a 10200 MPa en la dirección longitudinal y transversal. El módulo de elasticidad en las direcciones U1 y U2 de los paneles se determinan según las expresiones propuestas por Breneman, 2016. Estos se calcularon de la siguiente forma:

Diafragmas CLT A:

- Espesor : 3 capas $\rightarrow t_c = 60 \text{ mm}$; $t = 3t_c = 180 \text{ mm}$
- Largo panel : $l_p = 3 \text{ m}$



Así, el módulo de elasticidad en las direcciones U1 y U2 de los diafragmas CLT A son:

$$E_1 = E_x \cdot \frac{n \cdot t_c}{t} = 10200 \cdot \frac{60}{180} = 3400 \text{ MPa}$$

$$E_2 = E_y \cdot \frac{m \cdot t_c}{t} = 10200 \cdot \frac{2 \cdot 60}{180} = 6800 \text{ MPa}$$

Donde:

E_x : módulo de elasticidad transversal de la madera aserrada (MPa).

E_y : módulo de elasticidad longitudinal de la madera aserrada (MPa).

t_c : espesor de las capas contralaminadas (mm).

t : espesor total del panel CLT (mm).

n : N° de capas en la dirección transversal.

m : N° de capas en la dirección longitudinal.

El módulo de elasticidad en la dirección U3 se determina según la ecuación propuesta por Ávila (2019), como se indica en la sección 3.3.3. De este modo, el módulo de elasticidad en U3 se calcula de la siguiente forma:

$$E_3 = E_1 \cdot \frac{E_{3A}}{E_{1A}} = 3400 \cdot \frac{0.5}{4} = 425 \text{ MPa}$$

Donde:

E_1 : módulo de elasticidad del panel en la dirección x (MPa).

E_{1A} : módulo de elasticidad en la dirección x utilizado por Ashtari (2009).

E_{3A} : módulo de elasticidad en la dirección z utilizado por Ashtari (2009).

Diafragmas CLT B:

- Espesor : 5 capas $\rightarrow t_c = 60 \text{ mm}$; $t = 5t_c = 300 \text{ mm}$
- Largo panel : $l_p = 4.5 \text{ m}$

Así, el módulo de elasticidad en las direcciones U1 y U2 de los diafragmas CLT B son:

$$E_1 = E_x \cdot \frac{n \cdot t_c}{t} = 10200 \cdot \frac{2 \cdot 60}{300} = 4080 \text{ MPa}$$

$$E_2 = E_y \cdot \frac{m \cdot t_c}{t} = 10200 \cdot \frac{3 \cdot 60}{300} = 6120 \text{ MPa}$$



Donde:

E_x : módulo de elasticidad transversal de la madera aserrada (MPa).

E_y : módulo de elasticidad longitudinal de la madera aserrada (MPa).

t_c : espesor de las capas contralaminadas (mm).

t : espesor total del panel CLT (mm).

n : n° de capas en la dirección trasversal.

m : n° de capas en la dirección longitudinal.

El módulo de elasticidad en U3 se calcula de la siguiente forma según lo indicado en la sección 3.3.3:

$$E_3 = E_1 \cdot \frac{E_{3A}}{E_{1A}} = 4080 \cdot \frac{0.5}{4} = 510 \text{ MPa}$$

Donde:

E_1 : módulo de elasticidad del panel en la dirección x (MPa).

E_{1A} : módulo de elasticidad en la dirección x utilizado por Ashtari (2009).

E_{3A} : módulo de elasticidad en la dirección z utilizado por Ashtari (2009).

Diafragmas CLT C:

- Espesor : 5 capas $\rightarrow t_c = 60 \text{ mm}$; $t = 5t_c = 300 \text{ mm}$
- Largo panel : $l_p = 4.5 \text{ m}$

Así, el módulo de elasticidad en las direcciones U1 y U2 de los diafragmas CLT B son:

$$E_1 = E_x \cdot \frac{n \cdot t_c}{t} = 10200 \cdot \frac{2 \cdot 60}{300} = 4080 \text{ MPa}$$

$$E_2 = E_y \cdot \frac{m \cdot t_c}{t} = 10200 \cdot \frac{3 \cdot 60}{300} = 6120 \text{ MPa}$$

Donde:

E_x : módulo de elasticidad transversal de la madera aserrada (MPa).

E_y : módulo de elasticidad longitudinal de la madera aserrada (MPa).

t_c : espesor de las capas contralaminadas (mm).

t : espesor total del panel CLT (mm).



n : n° de capas en la dirección trasversal.

m : n° de capas en la dirección longitudinal.

El módulo de elasticidad en U3 se calcula de la siguiente forma según lo indicado en la sección 3.3.3:

$$E_3 = E_1 \cdot \frac{E_{3A}}{E_{1A}} = 4080 \cdot \frac{0.5}{4} = 510 \text{ MPa}$$

Donde:

E_1 : módulo de elasticidad del panel en la dirección x (MPa).

E_{1A} : módulo de elasticidad en la dirección x utilizado por Ashtari (2009).

E_{3A} : módulo de elasticidad en la dirección z utilizado por Ashtari (2009).

A.1.2 Módulos de corte

Los módulos de corte de los paneles en la dirección xy se determinan según lo propuesto por Yasumura, 2016. Este se calculó de la siguiente forma:

$$G_{12} = \frac{E_y}{e_1}$$

Donde:

E_y : módulo de elasticidad longitudinal de la madera aserrada (MPa).

e_1 : coeficiente indicado como 16.0 en la literatura (Gagnom y Popovski, 2011).

Así, el módulo de corte en xy es:

$$G_{12} = \frac{E_y}{e_1} = \frac{10200}{16} = 637.5 \text{ MPa}$$

Los módulos de corte en los planos xz e yz se determinan de la siguiente forma según lo propuesto por Yasumura, 2016:

$$G_{13} = \frac{GA_{eff-y}}{A_{full_y}}$$

$$G_{23} = \frac{GA_{eff-x}}{A_{full_x}}$$

Donde:



$GA_{eff,y}$: rigidez de corte efectiva en el eje y.

$GA_{eff,x}$: rigidez de corte efectiva en el eje x.

$A_{full,y}$: área de la sección transversal de todas las capas en y.

$A_{full,x}$: área de la sección transversal de todas las capas en x.

La rigidez de corte efectiva, como se indica en la sección 2.6, se calcula se la siguiente forma según lo establecido por la CSA O86:

$$GA_{eff} = \frac{\left(h - \frac{t_1}{2} - \frac{t_n}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_i}\right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{t_i}{G_i \cdot b_i}\right) + \left(\frac{t_n}{2 \cdot G_n \cdot b_i}\right)\right]}$$

Donde:

G_i : módulo de corte de las laminaciones en la i-ésima capa (MPa).

h : espesor del panel (mm).

b_i : ancho del panel en la dirección de análisis (mm).

t_i : espesor de las capas contralaminadas (mm).

n : n° de capas contralaminadas

Los módulos de corte en la dirección longitudinal y transversal del panel se obtienen como:

$$G_p = \frac{E_p}{e_1}$$

$$G_c = \frac{G_p}{e_2}$$

Donde:

G_p : módulo de corte en la dirección longitudinal del panel (MPa).

G_c : módulo de corte en la dirección longitudinal del panel (MPa).

E_p : módulo de elasticidad en la dirección longitudinal del papel (MPa).

e_1 y e_2 : coeficientes indicados en la literatura como 16.0 y 10.0, respectivamente. (CSA O86) (Gagnom y Popovski, 2011).

Así, los módulos de corte longitudinal y transversal del panel son:

$$G_p = \frac{E_p}{e_1} = \frac{10200}{16.0} = 637.5 \text{ MPa}$$



$$G_c = \frac{G_p}{e_2} = \frac{637.5}{10.0} = 63.7 \text{ MPa}$$

Luego, dado que la distribución de ejes es como se indica en la Figura 3.3.3.1, la rigidez de corte efectiva en y se determina se la siguiente forma en los diferentes modelos de diafragma:

Diafragmas CLT A:

$$GA_{\text{eff},y} = \frac{\left(h - \frac{t_1}{2} - \frac{t_3}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_p \cdot b_y}\right) + \left(\frac{t_2}{G_c \cdot b_y}\right) + \left(\frac{t_3}{2 \cdot G_p \cdot b_y}\right)\right]}$$

$$GA_{\text{eff},y} = \frac{\left(180 - \frac{60}{2} - \frac{60}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 3}\right) + \left(\frac{60}{63.7 \cdot 3}\right) + \left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 3}\right)\right]} = 41727.3 \text{ kN}$$

Diafragmas CLT B:

$$GA_{\text{eff},y} = \frac{\left(h - \frac{t_1}{2} - \frac{t_5}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_p \cdot b_y}\right) + \left(\frac{t_2}{G_c \cdot b_y} + \frac{t_3}{G_p \cdot b_y} + \frac{t_4}{G_c \cdot b_y}\right) + \left(\frac{t_5}{2 \cdot G_p \cdot b_y}\right)\right]}$$

$$GA_{\text{eff},y} = \frac{\left(180 - \frac{60}{2} - \frac{60}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 4.5}\right) + \left(\frac{60}{63.7 \cdot 4.5} + \frac{60}{637.5 \cdot 4.5} + \frac{60}{63.7 \cdot 4.5}\right) + \left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 4.5}\right)\right]} = 125181.8 \text{ kN}$$

Diafragmas CLT C:

$$GA_{\text{eff},y} = \frac{\left(h - \frac{t_1}{2} - \frac{t_7}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_p \cdot b_y}\right) + \left(\frac{t_2}{G_c \cdot b_y} + \frac{t_3}{G_p \cdot b_y} + \frac{t_4}{G_c \cdot b_y} + \frac{t_5}{G_p \cdot b_y} + \frac{t_6}{G_c \cdot b_y}\right) + \left(\frac{t_7}{2 \cdot G_p \cdot b_y}\right)\right]}$$

$$GA_{\text{eff},y} = \frac{\left(180 - \frac{60}{2} - \frac{60}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 6}\right) + \left(\frac{60}{63.7 \cdot 6} + \frac{60}{637.5 \cdot 6} + \frac{60}{63.7 \cdot 6} + \frac{60}{637.5 \cdot 6} + \frac{60}{63.7 \cdot 6}\right) + \left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 6}\right)\right]} = 250363.6 \text{ kN}$$

La rigidez de corte efectiva en x se calcula de manera similar, peso dado que se incluyeron variantes de ancho de panel de 1.2 m y 2.4 m, este valor variará para cada caso considerado. En este sentido, la rigidez de corte efectiva en x es:

Diafragmas CLT A:

$$GA_{\text{eff},x} = \frac{\left(h - \frac{t_1}{2} - \frac{t_3}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_p \cdot b_x}\right) + \left(\frac{t_2}{G_c \cdot b_x}\right) + \left(\frac{t_3}{2 \cdot G_p \cdot b_x}\right)\right]}$$



- Con ancho de panel 1.2m:

$$GA_{\text{eff}_x} = \frac{\left(180 - \frac{60}{2} - \frac{60}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 1.2}\right) + \left(\frac{60}{63.7 \cdot 1.2}\right) + \left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 1.2}\right)\right]} = 16690.9 \text{ kN}$$

- Con ancho de panel 2.4m:

$$GA_{\text{eff}_x} = \frac{\left(180 - \frac{60}{2} - \frac{60}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 2.4}\right) + \left(\frac{60}{63.7 \cdot 2.4}\right) + \left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 2.4}\right)\right]} = 33381.8 \text{ kN}$$

Diafragmas CLT B:

$$GA_{\text{eff}_x} = \frac{\left(h - \frac{t_1}{2} - \frac{t_5}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_p \cdot b_x}\right) + \left(\frac{t_2}{G_c \cdot b_x} + \frac{t_3}{G_p \cdot b_x} + \frac{t_4}{G_c \cdot b_x}\right) + \left(\frac{t_5}{2 \cdot G_p \cdot b_x}\right)\right]}$$

- Con ancho de panel 1.2m:

$$GA_{\text{eff}_x} = \frac{\left(180 - \frac{60}{2} - \frac{60}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 1.2}\right) + \left(\frac{60}{63.7 \cdot 1.2} + \frac{60}{637.5 \cdot 1.2} + \frac{60}{63.7 \cdot 1.2}\right) + \left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 1.2}\right)\right]} = 33381.8 \text{ kN}$$

- Con ancho de panel 2.4m:

$$GA_{\text{eff}_x} = \frac{\left(180 - \frac{60}{2} - \frac{60}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 2.4}\right) + \left(\frac{60}{63.7 \cdot 2.4} + \frac{60}{637.5 \cdot 2.4} + \frac{60}{63.7 \cdot 2.4}\right) + \left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 2.4}\right)\right]} = 66763.6 \text{ kN}$$

Diafragmas CLT C:

$$GA_{\text{eff}_x} = \frac{\left(h - \frac{t_1}{2} - \frac{t_7}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{t_1}{2 \cdot G_p \cdot b_x}\right) + \left(\frac{t_2}{G_c \cdot b_x} + \frac{t_3}{G_p \cdot b_x} + \frac{t_4}{G_c \cdot b_x} + \frac{t_5}{G_p \cdot b_x} + \frac{t_6}{G_c \cdot b_x}\right) + \left(\frac{t_7}{2 \cdot G_p \cdot b_x}\right)\right]}$$

- Con ancho de panel 1.2m:



GA_{eff_x}

$$= \frac{\left(180 - \frac{60}{2} - \frac{60}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 1.2}\right) + \left(\frac{60}{63.7 \cdot 1.2} + \frac{60}{637.5 \cdot 1.2} + \frac{60}{63.7 \cdot 1.2} + \frac{60}{637.5 \cdot 1.2} + \frac{60}{63.7 \cdot 1.2}\right) + \left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 1.2}\right)\right]}$$

$$= 50072.7 \text{ kN}$$

- Con ancho de panel 2.4m:

$$GA_{eff_x} = \frac{\left(180 - \frac{60}{2} - \frac{60}{2}\right)^2}{\left[\left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 2.4}\right) + \left(\frac{60}{63.7 \cdot 2.4} + \frac{60}{637.5 \cdot 2.4} + \frac{60}{63.7 \cdot 2.4} + \frac{60}{637.5 \cdot 2.4} + \frac{60}{63.7 \cdot 2.4}\right) + \left(\frac{60}{2 \cdot 637.5 \cdot 2.4}\right)\right]}$$

$$= 100145.4 \text{ kN}$$

Las áreas de la sección transversal de todas las capas en la dirección x e y para los diferentes modelos de diafragma son:

Diafragmas CLT A:

$$A_{full_y} = 2 \cdot t_c \cdot b_y = 2 \cdot 0.06 \cdot 3 = 0.36 \text{ m}^2$$

$$A_{full_x} = t_c \cdot b_x = 0.06 \cdot 1.2 = 0.072 \text{ m}^2 \quad (\text{Para } b_x = 1.2 \text{ m})$$

$$A_{full_x} = t_c \cdot b_x = 0.06 \cdot 2.4 = 0.144 \text{ m}^2 \quad (\text{Para } b_x = 2.4 \text{ m})$$

Diafragmas CLT B:

$$A_{full_y} = 3 \cdot t_c \cdot b_y = 3 \cdot 0.06 \cdot 4.5 = 0.81 \text{ m}^2$$

$$A_{full_x} = 2 \cdot t_c \cdot b_x = 2 \cdot 0.06 \cdot 1.2 = 0.144 \text{ m}^2 \quad (\text{Para } b_x = 1.2 \text{ m})$$

$$A_{full_x} = 2 \cdot t_c \cdot b_x = 2 \cdot 0.06 \cdot 2.4 = 0.288 \text{ m}^2 \quad (\text{Para } b_x = 2.4 \text{ m})$$

Diafragmas CLT C:

$$A_{full_y} = 4 \cdot t_c \cdot b_y = 4 \cdot 0.06 \cdot 6 = 1.44 \text{ m}^2$$

$$A_{full_x} = 3 \cdot t_c \cdot b_x = 3 \cdot 0.06 \cdot 1.2 = 0.216 \text{ m}^2 \quad (\text{Para } b_x = 1.2 \text{ m})$$

$$A_{full_x} = 3 \cdot t_c \cdot b_x = 3 \cdot 0.06 \cdot 2.4 = 0.432 \text{ m}^2 \quad (\text{Para } b_x = 2.4 \text{ m})$$



De este modo, los módulos de corte de los paneles en las direcciones xz e yz son los siguientes:

Diafragmas CLT A:

$$G_{13} = \frac{GA_{\text{eff}_y}}{A_{\text{full}_y}} = \frac{41727.3}{0.36} = 115.9 \text{ MPa}$$

$$G_{23} = \frac{GA_{\text{eff}_x}}{A_{\text{full}_x}} = \frac{16690.9}{0.072} = 231.8 \text{ MPa} \quad (\text{Para } b_x = 1.2 \text{ m})$$

$$G_{13} = \frac{GA_{\text{eff}_y}}{A_{\text{full}_y}} = \frac{33381.8}{0.144} = 231.8 \text{ MPa} \quad (\text{Para } b_x = 2.4 \text{ m})$$

Diafragmas CLT B:

$$G_{13} = \frac{GA_{\text{eff}_y}}{A_{\text{full}_y}} = \frac{125181.8}{0.81} = 154.5 \text{ MPa}$$

$$G_{23} = \frac{GA_{\text{eff}_x}}{A_{\text{full}_x}} = \frac{33381.8}{0.144} = 231.8 \text{ MPa} \quad (\text{Para } b_x = 1.2 \text{ m})$$

$$G_{13} = \frac{GA_{\text{eff}_y}}{A_{\text{full}_y}} = \frac{66763.6}{0.288} = 231.8 \text{ MPa} \quad (\text{Para } b_x = 2.4 \text{ m})$$

Diafragmas CLT C:

$$G_{13} = \frac{GA_{\text{eff}_y}}{A_{\text{full}_y}} = \frac{252363.3}{1.44} = 173.8 \text{ MPa}$$

$$G_{23} = \frac{GA_{\text{eff}_x}}{A_{\text{full}_x}} = \frac{150072.7}{0.216} = 231.8 \text{ MPa} \quad (\text{Para } b_x = 1.2 \text{ m})$$

$$G_{13} = \frac{GA_{\text{eff}_y}}{A_{\text{full}_y}} = \frac{200145.4}{0.432} = 231.8 \text{ MPa} \quad (\text{Para } b_x = 2.4 \text{ m})$$

A.1.3 Cargas

Cada modelo de diafragma estará sometido a las siguientes cargas:

A.1.3.1 Carga muerta



Esta carga corresponde al peso propio de cada losa y variará dependiendo del espesor de los paneles CLT utilizados en cada modelo. El procedimiento para obtener esta carga es el siguiente, considerando que esta actúa como carga distribuida en la losa:

$$q_{pp} = \rho \cdot h$$

Donde:

ρ : densidad normal del pino radiata. Este parámetro se obtuvo de la norma NCh1198 anexo E.

$$\rho = 476 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

h : espesor de la losa (mm).

Así, la carga muerta para cada modelo es la siguiente:

- Diafragmas con luz libre de 3 (m): $q_{pp_A} = \rho \cdot 3t_c = 85.7 \left[\frac{kg}{m^2} \right]$
- Diafragmas con luz libre de 4.5 (m): $q_{pp_B} = \rho \cdot 5t_c = 142.8 \left[\frac{kg}{m^2} \right]$
- Diafragmas con luz libre de 6 (m): $q_{pp_C} = \rho \cdot 7t_c = 199.9 \left[\frac{kg}{m^2} \right]$

A.1.3.2 Sobrecarga

Esta carga corresponde a la sobrecarga permanente de uso, la cual se obtiene de la norma NCh1537 tabla 4.

Para el caso de pisos y viviendas en áreas de uso general, la sobrecarga es:

$$q_{SC} = 200 \left[\frac{kg}{m^2} \right]$$

De este modo, la combinación de cargas gravitatorias que se aplicarán a las losas serán:

- Diafragmas con luz libre de 3 (m): $q_{total} = q_{pp_A} + 0.25 \cdot q_{SC} = 135.7 \left[\frac{kg}{m^2} \right]$
- Diafragmas con luz libre de 4.5 (m): $q_{total} = q_{pp_B} + 0.25 \cdot q_{SC} = 192.8 \left[\frac{kg}{m^2} \right]$
- Diafragmas con luz libre de 6 (m): $q_{total} = q_{pp_C} + 0.25 \cdot q_{SC} = 249.9 \left[\frac{kg}{m^2} \right]$



A.1.3.3 Cargas laterales

El análisis de carga lateral se realizará de forma incremental registrando las deformaciones laterales máximas que se producen en el centro de los diafragmas y el desplazamiento de las conexiones de corte entre paneles. El incremento de carga lateral a analizar va desde los 20 kN/m hasta los 200 kN/m, con incrementos de 20 kN/m. En este sentido, los niveles de carga a analizar en los diafragmas son los siguientes:

| Nº Ensayo | Carga lateral (kN/m) |
|------------------|---------------------------------|
| 1 | 20 |
| 2 | 40 |
| 3 | 60 |
| 4 | 80 |
| 5 | 100 |
| 6 | 120 |
| 7 | 140 |
| 8 | 160 |
| 9 | 180 |
| 10 | 200 |

ANEXO B

B.1 SISTEMAS DE CONEXIÓN ENTRE PANELES DE MADERA CONTRALAMINADA

La sección a continuación, entrega información acerca de los tipos de uniones entre paneles de uso común en sistemas de madera contralaminada.

B.1.1 Tipos de Uniones

B.1.1.1 Unión de ranura interna

Para formar esta conexión, se puede utilizar una ranura simple o doble hecha de madera contrachapada. La ranura en entre los bordes del panel se puede unir mediante tornillos autoperforantes, tornillos para madera, clavos o púas. Una ventaja de esta conexión es la alta resistencia lateral debido al doble cizallamiento en que se cargan los sujetadores. Además, presentan una buena resistencia a fuerzas normales y fuera del plano. Es posible aplicar adhesivo estructural además de los sujetadores mecánicos para proporcionar mayor rigidez a la conexión, si fuera necesario. La Figura B.1.1.1 muestra un esquema de este tipo de unión con una sola ranura.

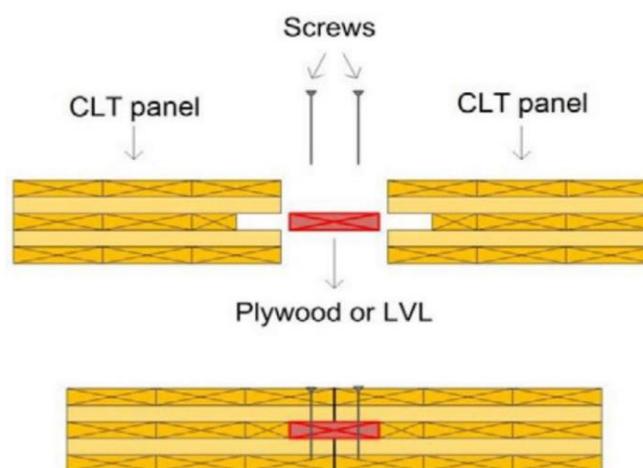


Figura B.1.1.1 Unión de ranura interna (*FPIinnovations, 2019*).

B.1.1.2 Unión de ranura de superficie simple

Este tipo de conexión es bastante simple y se rápido montaje en sitio. Los paneles CLT se perfilan a lo largo de los bordes para instalar una ranura de madera contrachapada. Esta ranura se conecta a la madera contrachapada mediante tornillos autoperforantes, tornillos largos para madera, clavos, púas o una combinación de estos. Como los sujetadores de este tipo de unión trabajan a corte simple, ésta presenta valores de resistencia lateral menores a la resistencia de la unión de ranura interna descrita anteriormente. Sin embargo, debido a su simplicidad, es preferida por diseñadores y constructores, siendo el tipo de conexión que se utiliza a menudo para conectar paneles en sistemas de piso. Además, al igual que la unión anterior, puede usarse adhesivo estructural para entregar una mayor rigidez.

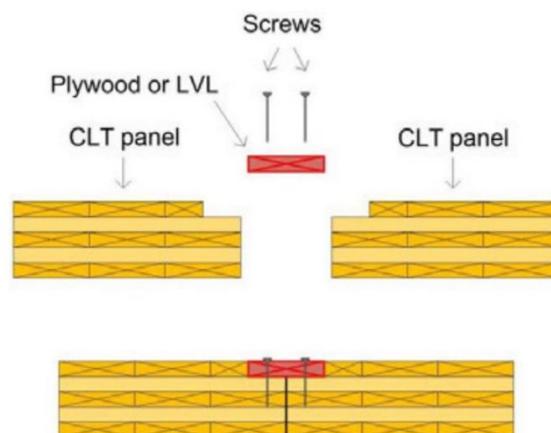


Figura B.1.1.2 Unión Surface Spline (*FPIinnovations, 2019*).

B.1.1.3 Unión de ranura interna

Esta conexión es similar a la conexión Surface Spline, excepto que se agrega una segunda ranura en la cara opuesta de los paneles para aumentar la resistencia y rigidez de la conexión (Figura B.1.1.3). Esto ocurre por la utilización de dos pares de sujetadores en la conexión, que da como resultado la duplicación de los planos de corte que resisten la carga, logrando así una mayor resistencia. Sin embargo, esta conexión requiere de mayor mecanismo y más tiempo de montaje, pues es necesario sujetar las estrías a ambos lados de los paneles. Si se utiliza madera contrachapada para las ranuras, la junta podría diseñarse para resistir el momento de la carga fuera del plano de corte. Además, podría usarse adhesivo estructural para lograr mayor rigidez.

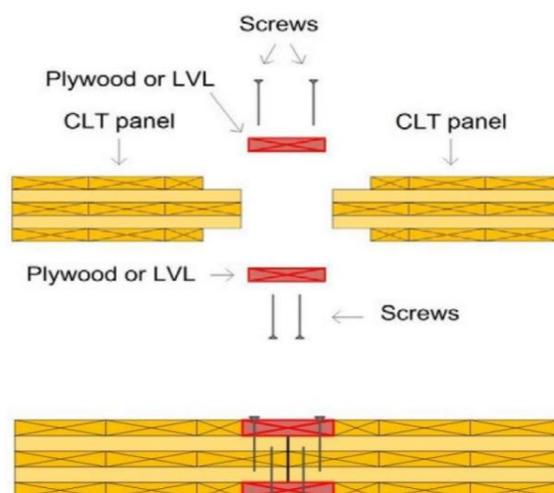


Figura B.1.1.3 Unión de ranura de superficie doble (Hossain, 2016).

B.1.1.4 Unión de media vuelta

Esta conexión se usa comúnmente para conexiones en el plano de paredes y pisos. En su preparación las medias vueltas se muelen a lo largo de los bordes del panel y se utilizan comúnmente tornillos autoperforantes largos para conectar los paneles en sitio. La articulación puede resistir el corte en el plano y las fuerzas normales, pero no se considera que sea una conexión que resista el momento (Augustin M. , 2008) Si bien se trata de una conexión muy simple que facilita el montaje en sitio, existe el riesgo de que la sección transversal se parta debido a la concentración de tensión perpendicular a las tensiones del grano en el área de muescas. Esto es particularmente riesgoso frente a la ocurrencia de cargas desiguales en los elementos de piso (Augustin M. , 2008).

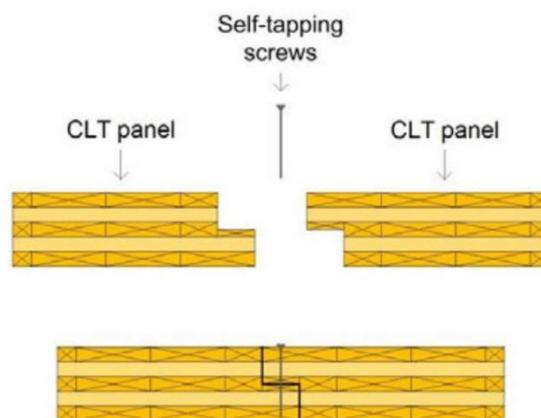


Figura B.1.1.4 Unión Half-Lap (*Hossain, 2016*).

B.1.1.5 Unión de junta a tope

Las conexiones de Butt Joint son conexiones de corte que utilizan tornillos autopercutores en su instalación. Este tipo de conexión presenta valores de rigidez mucho más elevados que las conexiones Surface Spline, donde los tornillos instalados a 45° contribuyen a la capacidad de corte de la conexión ya sea en la compresión o en la extracción del tornillo.

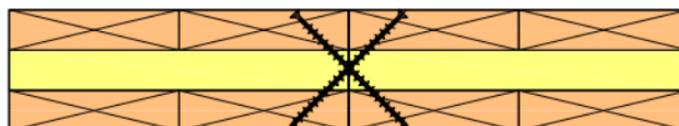


Figura B.1.1.5 Unión Butt Joint (*Hossain, 2016*).

B.1.2 Diseño de uniones Panel-Panel

Como base para el diseño de las conexiones se utilizarán las conexiones Surface Spline, con propiedades de los sujetadores según lo descrito por Sullivan y col. (2018). Los sujetadores utilizados fueron tornillos SWG ASSY 3.0 Eco de 10x100 mm, parcialmente roscados.

Se analizará como modelo inicial un diafragma de sección rectangular ($L/B=2$) con luz libre de 3 m y ancho de panel 1.2 m. Según lo descrito en la sección 3.2.2, este tipo de diafragma está compuesto por paneles de 3 capas de espesor 60 mm. El límite de relación de aspecto del diafragma es de 4.0 para CLT con juntas estriadas de madera contrachapada, según lo indicado en la Tabla B.1.2.1 para diafragmas de paneles estructurales de madera bloqueada.



Table 4.2.4 Maximum Diaphragm Aspect Ratios

(Horizontal or Sloped Diaphragms)

| Diaphragm Sheathing Type | Maximum L/W Ratio |
|--|-------------------|
| Wood structural panel, unblocked | 3:1 |
| Wood structural panel, blocked | 4:1 |
| Single-layer straight lumber sheathing | 2:1 |
| Single-layer diagonal lumber sheathing | 3:1 |
| Double-layer diagonal lumber sheathing | 4:1 |

Tabla B.1.2.1 Razones de aspecto máximas del diafragma (SPDWS, 2015).

Las cargas de diseño a utilizar en este caso serán las cargas externas sobre las cuales se quiere analizar el nivel de resistencia y rigidez del diafragma. De estas cargas laterales externas, se tomará la más desfavorable, esta es:

$$Q_{lat} = 200 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

La carga de corte en una junta es la siguiente:

$$V_{eq} = Q_{lat} \cdot \left(\frac{L}{2} \right)$$

Donde:

L : dimensión del diafragma perpendicular a la aplicación de la carga (m).

Q_{lat} : carga lateral solicitante (kN/m).

El largo del diafragma es $L = 6m$, por lo tanto, sustituyendo se tiene que la carga de corte en una junta es:

$$V_{eq} = 200 \left[\frac{kN}{m} \right] \cdot \frac{6 [m]}{2} = 600 [kN]$$

La carga de corte distribuida a lo largo del panel es:

$$v_{eq} = \frac{V_{eq}}{B}$$

El ancho del diafragma corresponde al largo del panel, el cual para este modelo de diafragma es de 3 m. Así, la carga de corte distribuida a lo largo del panel es:



$$v_{eq} = \frac{600 [kN]}{3 [m]} = 200 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

El nivel de carga de diseño bajo el método ASD considera un factor de seguridad del 70% de la carga total. En este sentido, la carga de diseño es:

$$v_d = 0.7 \cdot v_{eq}$$

Sustituyendo el valor de la carga de corte a lo largo del panel, se tiene la siguiente carga de diseño:

$$v_d = 0.7 \cdot 200 \left[\frac{kN}{m} \right] = 140 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

La tensión de corte admisible de la madera se obtuvo de la Nch1189 para pino radiata seco de grado C24 con 12% de humedad. Esta indica que la tensión de corte admisible es de 1.1 MPa (Tabla B.1.2.2). Así, la capacidad de corte admisible de la madera CLT C24 en el plano de corte de la conexión es:

$$V_r = 1.1 [MPa] \cdot \frac{L}{2}$$

Reemplazando el largo del diafragma, la capacidad de corte admisible es:

$$V_r = 1.1 [MPa] \cdot \frac{6 [m]}{2} = 3300 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

Por lo tanto, como $V_r > v_d$, la carga de diseño está dentro del rango de carga admisible de la madera CLT. El valor obtenido de la carga admisible es bastante mayor a la carga de diseño, lo cual tiene sentido dado que la capacidad de corte en el plano del panel CLT (V_r), generalmente es grande en comparación con la capacidad al corte de las conexiones panel-panel.



b) Pino radiata seco: $H = 12\%$

| Grado estructural | Tensiones admisibles de | | | | | Módulo de elasticidad en flexión $E_f^{2)}$ | Índice de aplastamiento en compresión normal $E_{cn,h}$ (MPa/mm) |
|---|--------------------------------|---------------------------------|---|-------------------------------|---------------------|--|--|
| | Flexión ¹⁾ F_f | Compresión paralela F_{cp} | Tracción paralela ¹⁾ F_{tp} | Compresión normal F_{cn} | Cizalle F_{cz} | | |
| a) Visuales | | | | | | | |
| GS | 11,0 | 8,5 | 6,0 | 2,5 | 1,1 | 10 500 | 5,65 |
| G1 | 7,5 | 7,5 | 5,0 | 2,5 | 1,1 | 10 000 | |
| G1 y mejor | 9,5 | 7,8 | 5,5 | 2,5 | 1,1 | 10 100 | |
| G2 | 5,4 | 6,5 | 4,0 | 2,5 | 1,1 | 8 900 | |
| b) Mecánicos | | | | | | | |
| C24 | 9,3 | 8,0 | 4,7 | 2,5 | 1,1 | 10 200 | 5,65 |
| C16 | 5,2 | 7,5 | 3,5 | 2,5 | 1,1 | 7 900 | |
| 1) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal 90 mm. 2) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal ≥ 180 mm. El módulo de elasticidad característico inherente al percentil del 5%, E_{fk} , se puede estimar como $0,60 E_f$. | | | | | | | |

Tabla B.1.2.2 Tensiones admisibles pino radiata seco (MPa) (NCh1198, Tabla 4b).

Como se mencionó con anterioridad, los sujetadores utilizados en los modelos son los utilizados en el estudio realizado por Sullivan y col. (2018). Estos sujetadores son tornillos parcialmente roscados de 10x100 mm (Figura B.1.2.1).

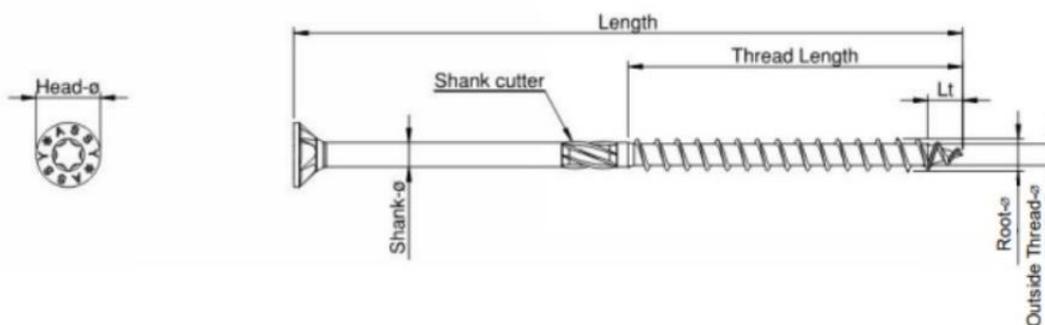


Figura B.1.2.1 Tornillos SWG ASSY 3.0 Eco de cabeza avellanada con huecos de fresado.

Referencia: Informe de evaluación ICC-ES ESR-3179 de octubre del 2014.

La penetración real del tornillo en la madera contralaminada es:

$$l_m = l - l_s$$



Donde:

l : longitud del tornillo; $l = 100$ [mm].

l_s : espesor de la madera contrachapada; $l_s = 1$ [in] = 25.4 [mm]

Así, la penetración real del tornillo en la madera contralaminada es:

$$l_m = 100 - 25.4 = 74.6 \text{ [mm]}$$

Los valores mínimos de separación y penetración de los tornillos en su instalación se calculan como $5d$ y $6d$, respectivamente (d : diámetro del tornillo). Así, al reemplazar el valor del diámetro, la separación y penetración mínima de los tornillos es:

$$s_{min} = 5d = 5 \cdot 10 \text{ [mm]} = 50 \text{ [mm]}$$

$$p_{min} = 6d = 6 \cdot 10 \text{ [mm]} = 60 \text{ [mm]}$$

El factor de duración de carga (C_D) se determinó de acuerdo con la NDS-2015, Tabla 2.3.2, que entrega los valores de factor de duración de carga de uso frecuente. Para el caso particular que se está analizando, la carga lateral correspondería a un escenario de carga lateral por viento o por evento sísmico. En este sentido, el factor C_D es igual a 1.6.

La NDS-2015, sección 12.3.1, entrega información útil para la determinación de los Valores de Referencia para el Diseño Lateral (Z) para corte simple y doble corte simétrico. Las ecuaciones de rendimiento límite permiten calcular el parámetro Z para los distintos modos de falla (**Tabla B.1.2.3**).

| Table 12.3.1A Yield Limit Equations | | | |
|--|--|--|---|
| Yield Mode | Single Shear | | Double Shear |
| I_m | $Z = \frac{D \ell_m F_{em}}{R_d}$ (12.3-1) | | $Z = \frac{D \ell_m F_{em}}{R_d}$ (12.3-7) |
| I_s | $Z = \frac{D \ell_s F_{es}}{R_d}$ (12.3-2) | | $Z = \frac{2 D \ell_s F_{es}}{R_d}$ (12.3-8) |
| II | $Z = \frac{k_1 D \ell_s F_{es}}{R_d}$ (12.3-3) | | |
| III_m | $Z = \frac{k_2 D \ell_m F_{em}}{(1 + 2R_e) R_d}$ (12.3-4) | | |
| III_s | $Z = \frac{k_3 D \ell_s F_{em}}{(2 + R_e) R_d}$ (12.3-5) | | $Z = \frac{2 k_3 D \ell_s F_{em}}{(2 + R_e) R_d}$ (12.3-9) |
| IV | $Z = \frac{D^2}{R_d} \sqrt{\frac{2 F_{em} F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$ (12.3-6) | | $Z = \frac{2 D^2}{R_d} \sqrt{\frac{2 F_{em} F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$ (12.3-10) |

Tabla B.1.2.3 Valores de Referencia para el Diseño Lateral (NDS, 2015).



En este caso, la capacidad de corte del sujetador se rige por el límite elástico a la flexión de tornillo en el larguero. El modo de falla asociado es el modo IIIs (**Figura B.1.3.I**). Dado esto, considerando además que la conexión analizada trabaja a corte simple, la ecuación a utilizar para determinar el valor Z es la ecuación 12.3-5 de la Tabla B.1.2.3; esto es:

$$Z = \frac{k_3 \cdot D \cdot l_s \cdot F_{em}}{(2 + R_e)R_d}$$

Donde:

D : diámetro (mm).

l_s : espesor de la madera contrachapada (mm).

F_{em} : resistencia del pasador del miembro principal (kN/mm).

R_d = término de reducción.

$R_e = F_{em}/F_{es}$

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1+R_e)}{R_e} + \frac{2F_{yb}(2+R_e)D^2}{3F_{em} \cdot l_m^2}}$$

F_{es} : Resistencia del pasador del miembro lateral (kN/mm).

F_{yb} : Límite elástico de flexión del pasador.

Nota: se considerará que el pasador del tornillo se extiende lo suficiente más allá del plano de corte, por lo cual se utilizará el diámetro del pasador para el cálculo de Z' . Esto generará un aumento en Z y, por tanto, un aumento de la capacidad de los tornillos. Así mismo, permitirá tener un espaciado de los tornillos mayor. De este modo, el diámetro D a utilizar corresponde al diámetro del vástago del tornillo (D_v) que corresponde a 7.2 mm.

La resistencia del pasador del miembro lateral y principal se determina según la Tabla 12.3.3 de la NDS (2015), para una gravedad específica de 0.45 recomendada en Chile para paneles de madera de pino radiata con densidad característica de 476 kN/m³. De acuerdo a esto, la resistencia del pasador del miembro lateral y principal es 1900 psi y 5050 psi, respectivamente. El límite elástico en flexión del pasador corresponde a 150200 psi, de acuerdo a la ICC ESR 3179, Tabla 1. De este modo, el término R_e es:

$$R_e = \frac{5050 \text{ [psi]}}{1900 \text{ [psi]}} = 2.66$$

Cuando el modo de falla del conector corresponde a los modos III_m, III_s o IV, el término de reducción R_d se determina como $3.2K_\theta$.

$$K_\theta = 1 + 0.25(\theta/90)$$

Donde:



θ : máximo ángulo entre la dirección de carga y la dirección del grano para cualquier miembro en la conexión ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$).

Dado que $\theta = 0$, el término K_θ es igual a 1, lo cual deja un factor de reducción R_d igual a 3.2.

Si se sustituyen todos los parámetros determinados sobre la expresión del término kk_3 , se tiene que:

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1 + 2.66)}{2.66} + \frac{2 \cdot 150200 \cdot (2 + 2.66)7.2^2}{3 \cdot 5050 \cdot 74.6^2}} = 0.901$$

De este modo, el valor de referencia para el diseño lateral Z es:

$$Z = \frac{0.901 \cdot 7.2 \cdot 25.4 \cdot 5050 \cdot (6.89 \times 10^{-6})}{(2 + 2.66)3.2} = 0.385 \text{ kN}$$

Nota: el término 6.89×10^{-6} alude a la conversión de la resistencia del pasador del miembro principal, de psi a kN/mm.

Luego, aplicando el factor de duración de carga, se tiene Z' es:

$$Z' = Z \cdot C_D$$

Sustituyendo Z y C_D :

$$Z' = 0.385 \cdot 1.6 = 0.616 \text{ kN}$$

Finalmente, el espaciado requerido para las conexiones entre paneles está dado por:

$$l_{requerido} = \frac{Z' \cdot b_p}{v_d}$$

Nota: el ancho de panel b_p en esta ecuación se debe ingresar en pulgadas. El ancho de panel es de 1.2 m (47.244 in).

Así, el espaciado requerido es:

$$l_{requerido} = \frac{0.616 \cdot 47.244}{140} = 20.7 \text{ [cm]}$$

El espaciado mínimo requerido (s_d) era de 50 mm. De este modo, el espaciado a utilizar para las conexiones de corte entre panel será de 20 cm en cada modelo.

B.1.3 Modos de falla en conexiones de corte

Las conexiones de corte entre paneles están diseñadas para fallar bajo el modo III según NDS. Este modo consiste en doblar o ceder el tornillo en una ubicación en el miembro lateral correspondiente a la madera contrachapada, y triturar la madera en el miembro lateral y principal correspondiente a los paneles de madera contralaminada.

El Modo IV representa el rendimiento del sujetador al doblarse en dos puntos de articulación por plano de corte, con un aplastamiento localizado de las fibras de madera cerca del plano.

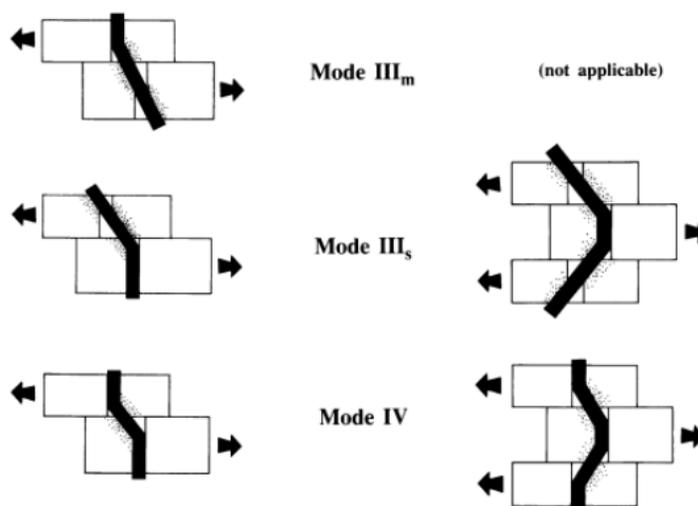


Figura B.1.3.1 Modos de falla de la conexión (NDS, 2015).

B.2 DIAGRAMAS DE HISTERESIS

Dentro de los modelos ensayados en el estudio realizado por Sullivan en el año 2016 con conexiones Surface Spline, se considerará como referencia la construcción n°2 que utilizó tornillos autoperforantes de 10 mm de espesor y 100 mm de largo, instalados cada 152 mm sobre paneles de 610 mm de ancho y 2.44 m de largo. La histéresis de esta conexión es como indica la figura (Figura B.2.1.a). La rigidez de esta conexión es de 0.71 kN/mm por sujetador.

Para la conexión Butt Joint se tomó como referencia el ensayo experimental realizado por Danzig (2014), donde se ensayaron conexiones de corte Butt Joint utilizando tornillos autoperforantes de 8 mm de diámetro y 180 mm de longitud en paneles de madera contralaminada de 3 capas. La histéresis de esta conexión es como indica la figura (Figura B.2.1.b). La rigidez de esta conexión es de 6 kN/mm por sujetador.

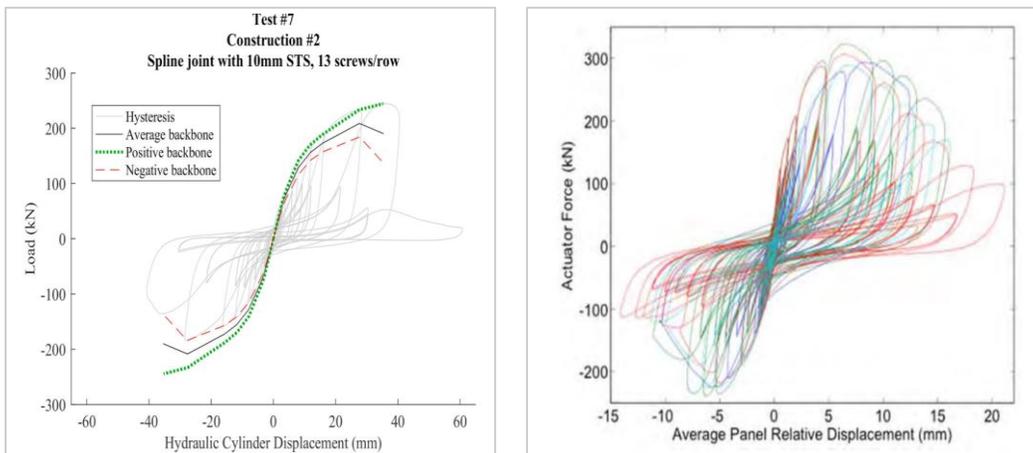


Figura B.2.1 Histerisis de prueba de las conexiones: a) Surface Spline (Sullivan, 2018) ; b) Butt Joint (Danzig, 2014).

El ajuste se realizó en base al modelo pivote de SAP2000 considerando los puntos de variación en las zonas elásticas de las conexiones. La **Figura B.2.2** muestra el ajuste realizado para ambas conexiones.

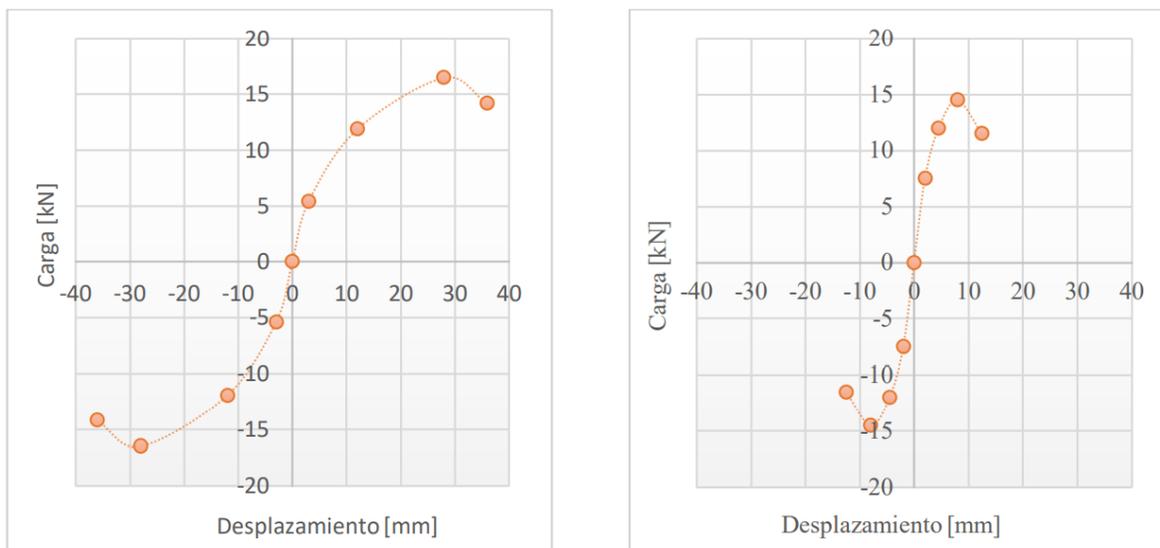


Figura B.2.2 Ajuste Histéresis: a) conexión Surface Spline; b) conexión Butt Joint