

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Mg. Franco Benedetti L.

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN MURO TRIDIMENSIONAL DE MADERA CONTRALAMINADA”

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

SEBASTIÁN RAÚL SEPÚLVEDA CABEZAS

Concepción, Octubre de 2019.

DEDICATORIA

A mis Padres, Luis y Rosa, y a mi Hermano, Ignacio.
Gracias por su Apoyo y Confianza en todo momento, sin
ello, no lo hubiese logrado, es de ustedes igualmente.

A mis Familiares, gracias por las alegrías y palabras
de aliento, siempre confiaron en mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre y hermano, quienes siempre estuvieron para mí, sobre todo para contenerme cuando más lo necesite.

Principalmente a mi profesor guía Franco Benedetti Leonelli, por su paciencia, confianza y además constante apoyo a lo largo de la presente investigación y en mi formación como profesional, brindándome apoyo tanto en lo académico como en lo personal. Gracias por sus palabras de ayuda y apoyo académico.

A mis compañeros y amigos, quienes hicieron un pasar grato en esta etapa universitaria; me ayudaron, contuvieron, alegraron mis días, peleamos en algunos momentos, pero finalmente, a pesar de todo, conservamos una unión.

A quienes me brindaron ayuda a lo largo de la presente memoria, profesor Alexander Opazo, Víctor Rosales, Alan Jara. Al equipo del área estructural CITEC UBB y del Laboratorio de Diseño y Tecnología de la Madera, por su gran colaboración, buena voluntad y enseñanzas hacia mi persona. A la empresa Simpson Strong-Tie Company Inc. y Empresa CMPC, por el apoyo a la Universidad en Investigaciones.

A mis profesores a lo largo de toda la carrera, quienes me brindaron conocimientos y habilidades para el día de mañana. Al personal del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, quienes día a día con su trabajo aportan a la formación de los alumnos.

A mi novia, por tu amor, paciencia, palabras, apoyo, confianza, momentos, compañía, sonrisas y estar siempre cuando lo necesité; por todo.

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN MURO TRIDIMENSIONAL DE MADERA CONTRALAMINADA”

Sebastián Sepúlveda Cabezas.

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

sebsepul@alumnos.ubiobio.cl

Mg. Franco Benedetti Leonelli.

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

fbenedet@ubiobio.cl

RESUMEN

En los últimos años, el progreso de la investigación en madera referente a sistemas constructivos ha ido en aumento considerablemente, siendo uno de los más recientes la madera contralaminada. En cuanto a experiencias tanto nacionales como internacionales, se han hecho diversos esfuerzos en términos de caracterización de elementos logrados de manera satisfactoria, sin embargo, la experiencia internacional sigue siendo precaria para sentar precedentes de su desempeño estructural.

La presente tesis hace alusión a ensayos cuasiestáticos de carga lateral en una configuración de muro tridimensional de madera contralaminada a escala real. Para ello se realizó previamente un modelo numérico en un software de análisis de elementos finitos a modo de evitar un posible rechazo de ensayos, definiendo así dos casos de estudios, siendo estos llevados a cabo de manera satisfactoria, logrando visualizar y validar la importancia de los distintos tipos de conexiones y/o uniones entre paneles en referencia a la disipación de energía del sistema. Se evaluaron distintos parámetros como lo son rigidez, capacidad, ductilidad de sistema, caracterización del rango lineal y no lineal de la curva de respuesta, degradación estructural y además se observó variaciones de frecuencias en el sistema a lo largo de las experiencias.

Palabras Claves: CLT, Ensayo de Carga Lateral, Rigidez.

8387 Palabras Texto + 34 Figuras/Tablas*250 + 14 Figuras/Tablas*500 = 22887 Palabras Totales.

“EXPERIMENTAL EVALUATION OF A THREE DIMENSIONAL CROSS LAMINATED TIMBER WALL”

Sebastián Sepúlveda Cabezas.

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.

sebsepul@alumnos.ubiobio.cl

Mg. Franco Benedetti Leonelli.

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.

fbenedet@ubiobio.cl

ABSTRACT

In the last years, the progress of wood researching on construction systems has been increasing considerably, being the cross laminated timber one of the most recent. As for both national and international experiences, a number of efforts have been made in terms of characterization of successful elements of a satisfactory way, however, the international experience keeps on being precarious in order to establish a precedent of his structural performance.

This undergraduate thesis makes reference to quasi-static lateral load test in a full-scale three-dimensional cross laminated timber wall configuration. For this, a numerical model was previously made in a FEM software in order to avoid a possible rejection of tests, thus defining two studies cases, these being carried out satisfactorily, managing to visualize and validate the importance of the different types of connections and/or joints between CLT panels in reference to the system power dissipation. Different parameters were evaluated such as stiffness, capacity, system ductility, linear and nonlinear range characterization of the response curve, structural degradation, and also frequency variations in the system along the experiences.

Keywords: CLT, Lateral Load Test, Stiffness.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Justificación.....	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo General.....	12
1.2.2 Objetivos Específicos.....	12
1.3 Metodología.....	12
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Madera Contralaminada	14
2.1.1 Ventajas y Beneficios	16
2.1.2 Propiedades	16
2.1.3 Estudios y Estructuras Existentes.....	20
2.1.4 Uniones y/o Conectores.....	22
3. ENSAYO MECÁNICO.....	25
3.1 Configuración Estructural	25
3.2 Materiales	26
3.2.1 Paneles de CLT.....	26
3.2.2 Hold-Downs.....	27
3.2.3 Angle Brackets.....	27
3.2.4 Clavos Anulares.....	28
3.2.5 Tornillos Largos.....	28
3.2.6 Tornillos Junta Vertical.....	29
3.3 Herramienta Computacional y Análisis Empleados	29
3.3.1 Modelo de Paneles.....	29
3.3.2 Modelo de Conectores y Uniones.....	30
3.3.3 Análisis Estático No Lineal: PushOver.....	35
3.3.4 Casos de Estudio.....	36

3.4	Ensayo de Carga Lateral	37
3.4.1	Montaje de Probeta.....	37
3.4.2	Protocolo de Ensayo	38
3.4.3	Adquisición de Datos.....	39
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.	40
4.1	Curva de Capacidad.....	41
4.2	Deslizamiento Basal.....	43
4.3	Deslizamiento Relativo en Encuentro Perpendicular en Tracción.....	44
4.4	Levantamiento de Cabecera en Tracción.....	44
4.5	Desplazamiento Relativo en Junta Vertical.....	45
4.6	Frecuencias Instantáneas.	47
4.7	Demanda de Ductilidad y Degradación de Rigidez.	48
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	52
5.1	Conclusiones.....	52
5.2	Recomendaciones.....	52
6.	REFERENCIAS.....	53
7.	ANEXOS.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Metodología de Trabajo (Elaboración Propia, 2019).	13
Figura 2: Configuración de Panel de CLT (FPInnovation, 2011).	15
Figura 3: Ejemplos de secciones transversales de paneles de CLT (FPInnovations, 2011). ..	15
Figura 4: Deformación debido al corte por rodadura de un panel de CLT de 5 capas (FPInnovations, 2011).	18
Figura 5: Factores de composición "k" para paneles de madera solida (Blass, 2004).	19
Figura 6: Valores efectivos de resistencia y rigidez para paneles de madera solida (Blass, 2004).	19
Figura 7: Edificio de 7 pisos en mesa vibratoria (Ceccotti et al., 2013).	20
Figura 8: Estructura con paneles largos (Izquierda) y Paneles Cortos (Derecha) (Yasumura et al., 2015).	21
Figura 9: Estructuras de CLT antes de la carga (a) en la dirección E-W; (b) en la dirección N-S. (Popovski, 2015).	21
Figura 10: Uniones típicas entre paneles: a) Internal Spline, b) Single Surface Spline, c) Double Surface Spline, d) Half-Lapped Joint. (FPInnovations, 2011).	23
Figura 11: Unión perpendicular entre paneles: a) Tornillo Autoperforante ortogonal, b) Tornillo Autoperforante con angulo, C) Union con angulos metalicos.(FPInnovations, 2011).	23
Figura 12: Unión entre paneles de muro y piso: a) Tornillo Autoperforante, b) Angulo Metálico, c) Unión Mixta. (FPInnovations, 2011).	24
Figura 13: Unión muro de CLT - Fundación a través de conector metálico. (FPInnovations, 2011).	24
Figura 14: Lamina de Configuración Estructural de Ensayos (Jara, 2018).	25
Figura 15: Paneles de CLT (Elaboración Propia, 2019).	26
Figura 16: Hold-Down HTT4 (Simpson Strong-Tie).	27
Figura 17: Angle Bracket ABR255 (Simpson Strong-Tie).	28
Figura 18: Clavos Anulares CNA 4x60 (Simpson Strong-Tie).	28
Figura 19: Tornillo SDWS22800 (Simpson Strong-Tie).	28
Figura 20: Tornillo DSVT3R (Simpson Strong-Tie).	29
Figura 21: Modelo de Paneles de CLT (Elaboración Propia, 2019).	30
Figura 22: Modelo de Conexiones en Paneles de CLT (Elaboración Propia, 2019).	31
Figura 23: Aproximación No Lineal de Fuerza v/s Desplazamiento (Gavric, 2015b).	31

Figura 24: Arreglo Trilineal Hold Down WHT340 (Elaboración Propia, 2019).	32
Figura 25: Arreglo Trilineal Angle Bracket AE116 (Superior) y TTN240 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).	33
Figura 26: Arreglo Trilineal Unión Perpendicular Muro-Muro (Elaboración Propia, 2019).	33
Figura 27: Arreglo Trilineal Unión Perpendicular Muro-Losa (Elaboración Propia, 2019).	34
Figura 28: Arreglo Trilineal Unión Paralela Muro-Muro (Elaboración Propia, 2019).	34
Figura 29: Carga Lateral en Modelo Numérico (Elaboración Propia, 2019).	35
Figura 30: Vista frontal y Laterales de Configuración de Probetas, Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha) (Elaboración Propia, 2019).	36
Figura 31: Probeta de Ensayo N°1 Montada (Elaboración Propia, 2019).	38
Figura 32: Protocolo de Carga Aproximado de Ensayos (Elaboración Propia, 2019).	38
Figura 33: Curva Tipo Resultado del Protocolo de Carga (Elaboración Propia, 2019).	39
Figura 34: Posición de Transductores y Sismógrafos (Elaboración Propia, 2019).	40
Figura 35: Curva de Capacidad del Sistema Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).	42
Figura 36: Curva de Deslizamiento Basal Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).	43
Figura 37: Curva de Deslizamiento Relativo en Encuentro Perpendicular en Tracción Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).	44
Figura 38: Curva de Levantamiento de Muro Cabecera en Tracción Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).	45
Figura 39: Curva de Deslizamiento Relativo en Junta Vertical Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).	46
Figura 40: Estado Ultimo Junta Vertical Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha) (Elaboración Propia, 2019).	47
Figura 41: Lectura de Sismógrafos Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha) (Elaboración Propia, 2019).	47
Figura 42: Demanda de Ductilidad Locales y Global Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).	49
Figura 43: Calculo de Rigideces desde la Curva del Sistema (Elnashai and Di Sarno, 2008).	50

Figura 44: Relación entre la Rigidez y la Frecuencia para Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).....51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Módulos de Elasticidad y Cortante de Paneles de CLT (Elaboración Propia).....30

Tabla 2: Numero de Fijaciones en conectores de Probetas según Diseño de Ensayo Mecánico (Elaboración Propia, 2019).37

Tabla 3: Canales de Medición Empleados en Los Ensayos (Elaboración Propia, 2019).....40

Tabla 4: Resumen de Resultados Característicos del Sistema (Elaboración Propia, 2019)..42

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, nuestro país ha ido desarrollando una favorable industria forestal, basándose la madera como una de las principales materias primas exportadas debido a su bajo uso a nivel nacional como material de construcción predominante en viviendas y edificios públicos, dando preferencia a los materiales convencionales como lo son, por ejemplo, el concreto, el acero y albañilería, sin tener en consideración las ventajosas propiedades tanto mecánicas y medioambientales que podrían ponerlo en la palestra a competir con estos últimos.

No así ocurre en otros países, principalmente europeos y norteamericanos, quienes han aprovechado este recurso, innovando en sistemas constructivos en sus edificaciones, posicionándose la madera como material predominante en algunos casos. Es así como surge este nuevo sistema constructivo llamado Cross Laminated Timber (CLT), en español conocido como Madera Contralaminada, que presenta sus orígenes en Austria y Alemania en la década de los noventa, del cual hasta el día de hoy se han centrado en desarrollar diversas investigación con fin de indagar en su comportamiento y/o desempeño estructural.

Experiencias extranjeras con este material han indicado que en las construcciones de edificaciones de mediana y gran altura, en sitios donde existe actividad sísmica, han presentado exitosos resultados en términos de desempeño estructural (Gagnon y Pirvu, 2011).

En nuestro país actualmente la madera contralaminada casi no presenta uso, salvo algunas edificaciones de carácter privado, puesto que aún se requieren estudios que nos permitan predecir el comportamiento del sistema constructivo frente a las sollicitaciones expuestas en suelo nacional, siendo el principal peligro la alta sismicidad.

Es por esto que nacen nuevas investigaciones, como la presente, que buscan conocer anticipadamente el desempeño del CLT en sistemas de acoplamiento de partes, a través de herramientas computacionales y ensayos, con el fin de diseñar bajo modelos numéricos las experiencias reales.

1.1 Justificación

Según cifras entregadas por la Corporación Chilena de la Madera (CORMA), en Chile, el sector forestal, el cual incluye a los subsectores silvícola forestal e industria forestal (madera, muebles, celulosa, papel e imprentas), aportó un 2.1% del Producto Interno Bruto (PIB) en el año 2016. Por otro lado, el Instituto Forestal indica que Chile se encuentra en el top once en producción mundial de madera aserrada (EL SECTOR FORESTAL CHILENO, INFOR, 2018), principal producto utilizado en las construcciones en madera. Por otro lado, según el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), en 2016, la distribución de materiales predominantes en muro en el uso de construcción de edificaciones fue de un 52.9% de hormigón, 14.9% de ladrillo y solo un 13.1% en madera, siendo antes expuestos los datos del abundante recurso disponible en el territorio nacional. Se presume que la cifra alcanzada se debe a diversos factores que limitan a que se lleve a cabo una satisfactoria edificación en madera.

Es por eso que el tema propuesto se desarrollara para establecer un precedente en cuanto al análisis de estructuras tridimensionales construidas en madera contralaminada, puesto que no existen los casos de estudios suficientes que describan con certeza el desempeño global de este sistema constructivo, el cual ha sido probado y ejecutado en algunos países. Sin embargo, estos tienen bajos niveles de actividad sísmica, la cual es una de las principales problemáticas de estudio tanto a nivel nacional como internacional.

A modo de resumen, este estudio pretende entregar información relevante en el sector ingenieril acerca del comportamiento de estructuras de CLT en cuanto a sistemas acoplados, reflejado bajo una experiencia en laboratorio en un ensayo a escala real de una configuración estructural de muro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar experimentalmente la respuesta estructural bajo cargas laterales, de un muro tridimensional de madera contralaminada.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Establecer un estado del arte del comportamiento estructural de muros de madera contralaminada (CLT) sometidos a carga lateral.
- Diseñar el ensayo mecánico del muro tridimensional mediante el desarrollo de un modelo computacional.
- Realizar ensayos de carga lateral de un muro tridimensional de madera contralaminada sometido a escala real.
- Caracterizar el comportamiento estructural experimental de los casos de estudio definidos.

1.3 Metodología

Se detalló la metodología y las distintas etapas en las que consistió este trabajo, presentando el procedimiento llevado a cabo en cada una de ellas de manera general, para luego destacar aspectos claves.

En la primera etapa se procedió a revisar los antecedentes correspondientes a lo que es el sistema constructivo Cross Laminated Timber, entre lo cual se destaca su comportamiento estructural y sistemas de uniones, los estudios más relevantes en cuanto a estructuras experimentales, conceptos acerca de la respuesta estructural de un sistema, lo que lleva como hito obtener una revisión de antecedentes bibliográficos cumplido.

En la siguiente etapa, teniendo ya los previos conocimientos, se realizó la modelación del ensayo mecánico bajo la configuración estructural propuesta, correspondiente a la estructuración de los muros con sus respectivos herrajes, para luego de diseñar en base a análisis numéricos, obtener los casos de estudio a ensayar, marcando esta etapa la obtención del comportamiento numérico del sistema.

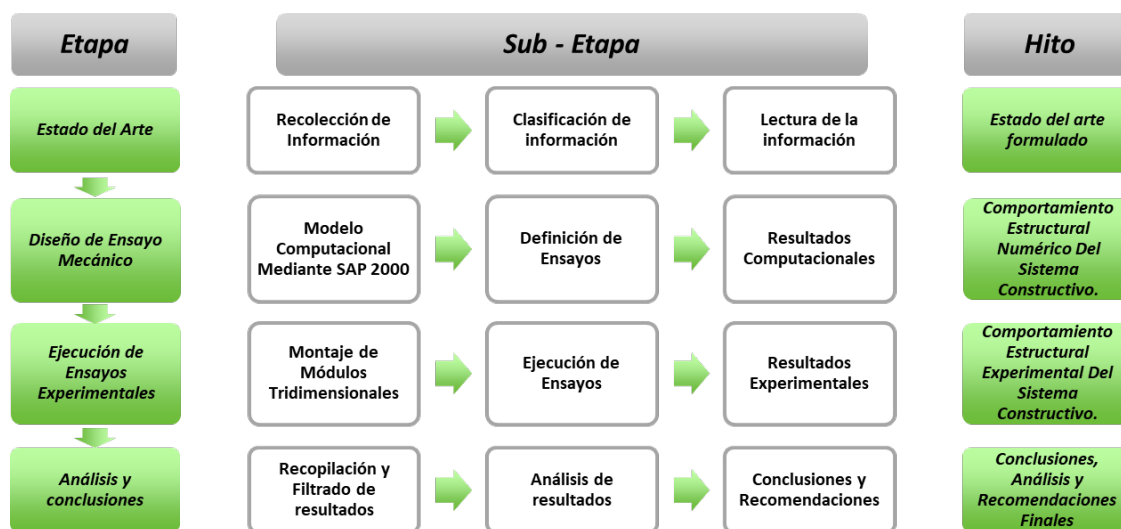


Figura 1: Metodología de Trabajo (Elaboración Propia, 2019).

La tercera etapa correspondió a la ejecución de los ensayos. Para ello, se llevó a cabo el montaje de la probeta en las dependencias universitarias. Luego de tener certeza de un correcto accionar, se realizó los ensayos a carga lateral de los casos de estudio previamente definidos, para finalmente obtener los resultados de ellos, conjunto a la obtención del comportamiento real del sistema.

Finalmente, se procedió a recolectar todos los resultados obtenidos, aplicando filtrados de datos de los cuales luego se analizó y concluyó, realizando recomendaciones respecto a futuras investigaciones y/o construcciones en el material involucrado.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el siguiente capítulo, se entrega información relevante desde el punto de vista conceptual que ayuda a comprender este estudio, entregando definiciones claves con el propósito de contribuir al entendimiento del sistema constructivo Cross Laminated Timber.

2.1 Madera Contralaminada

La madera contralaminada es un sistema constructivo relativamente nuevo, que se desarrolló por primera vez en Austria y Alemania desde donde ha ganado popularidad en edificaciones residenciales y no residenciales, principalmente, en Europa. A mediados de la década de los 90, Austria emprendió diversas investigaciones acerca del CLT, las cuales durante varios años su progreso fue lento, sin embargo, a principios de los años 2000, la construcción en este sistema incremento significativamente debido a diversos factores (medio ambientales, aprobación de productos, mejores canales de comercialización y distribución, etc.). Un factor importante es que se alcanzó la percepción de que el CLT es un sistema de construcción no ligero, como lo son la albañilería y el hormigón, hasta entonces quienes fuesen altamente utilizados en la construcción residencial de muchos países europeos. El fácil manejo en la construcción y alto nivel de prefabricación que permiten un bajo tiempo de montaje, son algunas de las ventajas claves, especialmente en edificaciones de mediana altura (por ejemplo, de 5a 8 pisos).

Los paneles de CLT consisten en capas (generalmente a 90° una de otra), compuestas por tablas apiladas de manera transversal y pegadas entre sí en su cara ancha y, a veces, también se encola en los cantos de las mismas. Una sección transversal de un tablero de CLT tiene por lo menos 3 capas de tableros colocadas en orientación ortogonal a su capa adyacente. Generalmente, un panel consta de tres a siete capas, o incluso más en ocasiones especiales. La Figura 2 ilustra la configuración de un panel típico de CLT en su proceso de manufactura, mientras que la Figura 3 muestra ejemplos de posibles secciones transversales de panel.

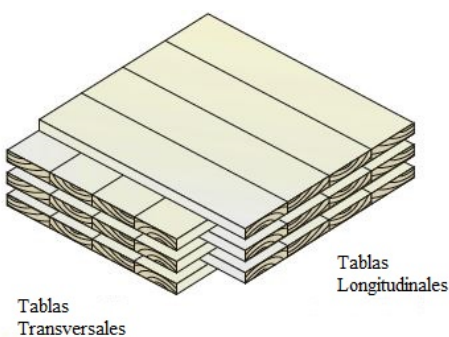


Figura 2: Configuración de Panel de CLT (FPInnovation, 2011).

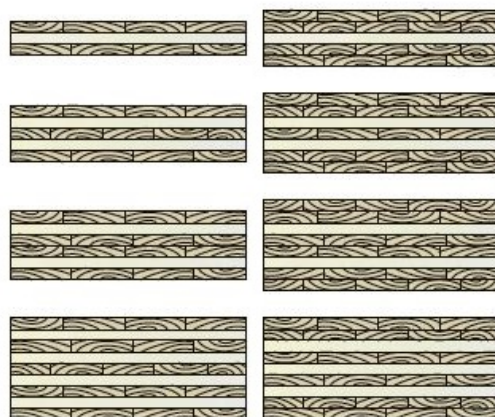


Figura 3: Ejemplos de secciones transversales de paneles de CLT (FPInnovations, 2011).

El espesor de las tablas puede variar de 10 mm a 50 mm y el ancho entre 60 mm a 240 mm. Los tableros son unidos mediante algún adhesivo estructural, además las tablas deben pasar por un proceso de clasificación visual o mecánica y ser secadas en horno. Los tamaños finales de los paneles varían según el fabricante, teniendo como ancho típico 0.6 metros, 1.2 metros y 3 metros, mientras que la longitud puede ser de hasta 18 metros y el espesor puede alcanzar los 400 mm.

La madera o tablas en las capas externas de paneles de CLT, que son utilizados como muros normalmente, están orientadas en dirección paralela a las cargas verticales, para maximizar su resistencia. Del mismo modo, para losas y techos, las capas exteriores están orientadas de manera paralela en dirección a la mayor luz que presenten.

2.1.1 *Ventajas y Beneficios*

En términos generales, los paneles tienen como objetivo proporcionar una estructura segura, que sea económica de construir y que cumpla con su función prevista de manera satisfactoria. Además, tienen el potencial de proveer una buena resistencia al fuego y está demostrado que los ensamblajes o uniones de muros de CLT pueden tener un buen rendimiento acústico tanto en edificios residenciales como no residenciales.

Con frecuencia, cuando hablamos de madera y su comparación de desempeño ambiental frente a otros materiales, como por ejemplo, el hormigón, se pone en la mesa el concepto de la huella de carbono. En particular, se supone que el CLT (debido a que está hecho de madera) tiene una baja huella de carbono, debido a las casi nulas emisiones de gases de efecto invernadero y a la capacidad de almacenar carbono, esto último debido a que la madera, si bien en su proceso de manufacturación industrial produce efectos contaminantes, esta tiene la capacidad de almacenar dióxido de carbono (CO₂) una vez expuesta a sus condiciones de uso.

Por la parte estructural, una de las características más importantes del CLT es su relación capacidad-peso. Cuando se carga, la madera puede tener una ventaja de relación capacidad/peso con respecto al acero de 2:1. Además, una estructura más liviana se traduce en fundaciones más pequeñas, lo que implica una reducción de costos en el proceso constructivo. (Laguarda Mallo and Espinoza, 2014). El proceso de fabricación, a través de laminación cruzada, le proporciona una estabilidad dimensional, la cual permite la prefabricación de losas anchas y largas y muros largos de un piso completo. Además, el contralaminado le proporciona altas propiedades de resistencia y rigidez tanto en el plano como fuera del plano (en ambas direcciones), lo que le confiere una capacidad de acción similar a la de una losa de hormigón armado.

2.1.2 *Propiedades*

Se han adoptado diferentes métodos para determinar las propiedades mecánicas del CLT. Algunos de estos son de carácter experimental, mientras que otros son analíticos. El problema con el enfoque experimental es que si se cambia algún parámetro tanto de fabricación como del material en sí, se necesitan más pruebas para evaluar las propiedades, por ejemplo, a flexión de estos nuevos paneles. Por otro lado, está el enfoque analítico, el cual una vez verificado con los datos experimentales, ofrece una alternativa general y menos costosa.

Un método analítico generalmente predice las propiedades de resistencia y rigidez del CLT basándose en las propiedades de las piezas de madera que conforman el panel de CLT. Si bien la rigidez a flexión suele ser de mayor interés para los diseñadores que la resistencia, ya que el diseño estructural en su mayoría se rige por criterios de capacidad de servicio, también es necesario caracterizar las propiedades de resistencias.

La resistencia y rigidez del módulo de corte por rodadura se considera como un problema clave que podría controlar el diseño y rendimiento de sistemas de losa o muro en CLT. La magnitud de la rigidez efectiva en flexión del panel y, en consecuencia, la distribución de la tensión en las tablas depende en gran medida de del módulo de corte de las tablas transversales (Fellmoser and Blass, 2004). Sin embargo, existe poca información disponible sobre propiedades de corte por rodadura de paneles de CLT o sobre la determinación de esta propiedad, el cual depende de muchos factores como la especie de la madera, densidad, espesor de laminación, contenido de humedad, tamaño y geometría de la sección transversal, etc.

En la literatura (Mestek et al. 2008), el módulo de corte por rodadura G_r es asumido como 1/10 del módulo de corte paralelo a la fibra de las piezas, G_0 , es decir:

$$G_r \approx \frac{G_0}{10}$$

De igual manera, basado en experiencias y literatura, el módulo de corte G se establece como una relación aproximadamente entre 1/12 y 1/20 del módulo de elasticidad de la tabla, es decir, $E_{TABLA}/G_0 \approx 12$ a 20.

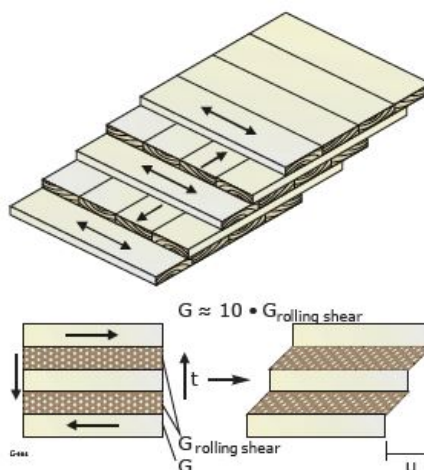


Figura 4: Deformación debido al corte por rodadura de un panel de CLT de 5 capas (FPInnovations, 2011).

Como se dijo anteriormente, existen diversos métodos analíticos de diseño para elementos de CLT, como lo son muros y losas, que sirven para determinar las propiedades mecánicas de los paneles. Algunos de ellos son: Teoría de Vigas Mecánicamente Unidas (Método Gamma), Teoría Compuesta (Método K), Método de Analogía Cortante. En esta investigación, se utilizó la teoría compuesta, por lo que se explicara en que consiste esta misma.

- Teoría Compuesta (Método K).

Este método fue propuesto en el CLT por los autores Blass y Fellmoser en el año 2004 y es bien conocido en la industria del contrachapado (plywood). En la versión original, las capas de los paneles de contrachapado, no se tienen en cuenta las tensiones perpendiculares a la fibra al calcular las propiedades en flexión (es decir, $E_{90} = 0$). Para poder superar estas deficiencias en el CLT, el método utilizado para calcular la rigidez efectiva en flexión (E_{Ieff}) se modificó y se basó en los siguientes propuestos:

- a) Se asume una relación de tensión – deformación lineal y la hipótesis de Bernoulli de secciones transversales planas;
- b) El método de cálculo se basa en las propiedades de capacidad y rigidez de todas las capas; capas cargadas paralelas y perpendiculares a la fibra. La rigidez de las capas transversales usada en los cálculos es tomada como: $E_{90} = E_0/30$;
- c) La deformación por corte no se tiene en cuenta, por lo tanto, el método se usa solo para paneles con relaciones de aspecto $l/h \geq 30$.

d) Los factores de composición K se determinan para ciertas configuraciones de carga, tal y como se especifica en la Figura 5.

La Figura 4 entrega las expresiones para evaluar los factores de composición k_i bajo ciertas configuraciones de carga con respecto a la orientación del panel, es decir, ya sea trabajando como muro o como losa. La Figura 6 muestra los valores efectivos de resistencia y rigidez para paneles de madera solida con capas transversales (Blass, 2004).

Load Configuration	k_i
	$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{1-2}^3 - a_{n-1}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_n^3}$
	$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{1-2}^3 - a_{n-1}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_n^3}$
	$k_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_x}\right) \frac{a_{1-2}^3 - a_{n-1}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_n^3}$
	$k_4 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{1-2}^3 - a_{n-1}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_n^3}$

Figura 5: Factores de composición "k" para paneles de madera solida (Blass, 2004).

Loading	To the grain of outer skins	Effective strength value	Effective stiffness value
Perpendicular to the plane loading			
Bending	Parallel	$f_{b,0,eff} = f_{b,0} \cdot k_1$	$E_{b,0,eff} = E_0 \cdot k_1$
	Perpendicular	$f_{b,90,eff} = f_{b,0} \cdot k_2 \cdot a_{m1}/a_{m2}$	$E_{b,90,eff} = E_0 \cdot k_2$
In-plane loading			
Bending	Parallel	$f_{b,0,eff} = f_{b,0} \cdot k_3$	$E_{b,0,eff} = E_0 \cdot k_3$
	Perpendicular	$f_{b,90,eff} = f_{b,0} \cdot k_4$	$E_{b,90,eff} = E_0 \cdot k_4$
Tension	Parallel	$f_{t,0,eff} = f_{t,0} \cdot k_3$	$E_{t,0,eff} = E_0 \cdot k_3$
	Perpendicular	$f_{t,90,eff} = f_{t,0} \cdot k_4$	$E_{t,90,eff} = E_0 \cdot k_4$
Compression	Parallel	$f_{c,0,eff} = f_{c,0} \cdot k_3$	$E_{c,0,eff} = E_0 \cdot k_3$
	Perpendicular	$f_{c,90,eff} = f_{c,0} \cdot k_4$	$E_{c,90,eff} = E_0 \cdot k_4$

Figura 6: Valores efectivos de resistencia y rigidez para paneles de madera solida (Blass, 2004).

2.1.3 Estudios y Estructuras Existentes.

En cuanto a las investigaciones previas a estructuras de madera contralaminada tenemos el caso de quienes han estudiado muros de corte de CLT (Dujic et al., 2006; Ceccotti et al., 2006; Sandhaas et al., 2009; Yasumura, 2012; Yasumura and Ito, 2014), análisis dinámicos para determinar el factor “q” (equivalente al factor R de la normativa sísmica de nuestro país) de desempeño en estructuras de CLT (Pozza et al., 2009; Ceccotti et al., 2010) y ensayos a escala real en una mesa vibratoria junto con análisis numéricos (Ceccotti et al., 2013; Tsuchimoto et al. 2014) destacando en esta última la investigación denominada Proyecto SOFIE y llevada a cabo principalmente por Ario Ceccotti, donde ensayó edificaciones de 1, 3 y 7 niveles, siendo esta última sometida a diversos registros sísmicos en una mesa vibratoria en tierras japonesas, el cual es considerado el estudio más completo en cuanto a la simulación real de una estructura de mediana altura.



Figura 7: Edificio de 7 pisos en mesa vibratoria (Ceccotti et al., 2013).

En cuanto a ensayos de cargas laterales, tenemos el caso de la investigación liderada por Motoi Yasumura, quien llevó a cabo dos estructuraciones a escala real, una de ellas con muros de paneles largos y otra de paneles cortos ensayándolas estas mismas a cargas laterales cíclicas, de las cuales realizó análisis no lineal con herramientas de elementos finitos para predecir el comportamiento de estas mismas, obteniendo conclusiones eficaces en el aspecto de modelación numérica.

Otro estudio a destacar es el realizado por Marjan Popovski, quien sometió a una estructura a escala real de 2 niveles a cargas laterales, aplicando cargas monotónicas y cíclicas teniendo como objetivo evaluar el desempeño en términos de capacidad de deformación, comportamiento global de la estructura, periodo fundamental de vibración antes y después de cada ensayo, desempeño de conectores y uniones entre paneles de CLT. Realizó cinco ensayos (1 Pushover y 4 cíclicos) en una sola dirección de carga, variando parámetros como dirección de cargas, número de hold-downs, número de tornillos en uniones perpendiculares, etc.

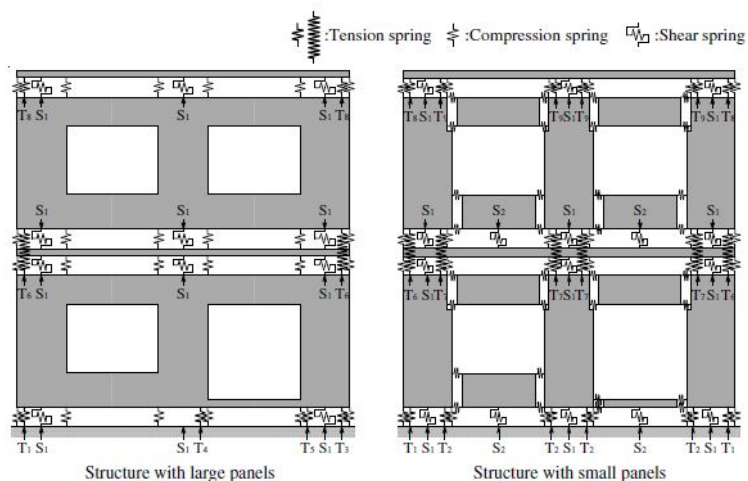


Figura 8: Estructura con paneles largos (Izquierda) y Paneles Cortos (Derecha) (Yasumura et al., 2015).

Se observaron mecanismos de falla por corte en clavos de angle-brackets resultando un deslizamiento y balanceo de los paneles, además de presentar fluencia en los clavos de los hold-down del primer nivel, sin embargo, en la mayoría de los casos, los paneles de muros y pisos permanecieron intactos.



Figura 9: Estructuras de CLT antes de la carga (a) en la dirección E-W; (b) en la dirección N-S. (Popovski, 2015).

2.1.4 Uniones y/o Conectores.

Es sabido que el CLT como sistema estructural, es bastante rígido, por lo que por sí solo, presenta dificultades en cuanto al desempeño sísmico de estructuras, por lo que ahí es donde entra en juego el rol de los conectores, quienes ayudan a la estructura en ese ámbito (Casagrande et. al, 2016). Los conectores proveen ductilidad a la edificación ayudando a que cuando ocurra algún tipo de falla en la estructura, esta ocurra en las uniones y no en los paneles, facilitando la reparación de la estructura. Cuando se trata de la unión de distintas configuraciones de paneles de CLT, se utilizan distintos tipos de herrajes, tornillos y/o clavos. En los conectores metálicos, principalmente, tenemos dos tipos de ellos que son denominados Angle Bracket (AB) y Hold-Down (HD). El primero de estos es una pieza metálica en forma de ángulo, principalmente diseñado para resistir esfuerzos cortantes que se produzcan en la estructura, sin despreciar su capacidad ante cargas axiales. Por otra parte, los hold-downs, también son una pieza metálica alargada, principalmente diseñados para trabajar ante grandes cargas axiales, en particular, la tracción, evitando así el levantamiento y/o volcamiento de paneles. Estos conectores presentan orificios a lo largo de su longitud, los cuales son perforados por clavos y/o tornillos, fijándolos al panel de CLT. En algunos casos, y especialmente en uniones a la fundación, se utilizan pernos de anclaje el cual como función principal tiene el de transmitir los esfuerzos presentes en el conector.

La junta entre paneles es en su dirección longitudinal generalmente es realizada in-situ; cuando se trata de paneles de muro, esta debe estar diseñada para resistir el corte en el plano y la flexión fuera del plano. En el caso de paneles de losa, la unión debe ser capaz de transferir las cargas en el diafragma y mantener el sistema resistente de fuerzas laterales.

Por otra parte, existe las uniones de paneles muro-muro perpendicular, las cuales generalmente se ejecutan utilizando tornillos largos autoperforantes los que poseen altas capacidades a la extracción directa y a cargas laterales. Estos sugieren ser colocados en ángulo, optimizando el rendimiento de la unión. En la unión muro-losa, se pueden usar los mismos sistemas que la unión muro-muro ortogonal, incluyendo la opción de utilizar un sistema mixto que mezcle ambos métodos. Finalmente, cabe destacar la unión muro- fundación que comúnmente es hormigón o una viga de metal, de la cual existen igualmente varios tipos de fijación, siendo la más utilizada las placas y/o soportes metálicos, utilizando tornillos en el ala que da hacia el CLT y un perno hacia la sujeción en la fundación.

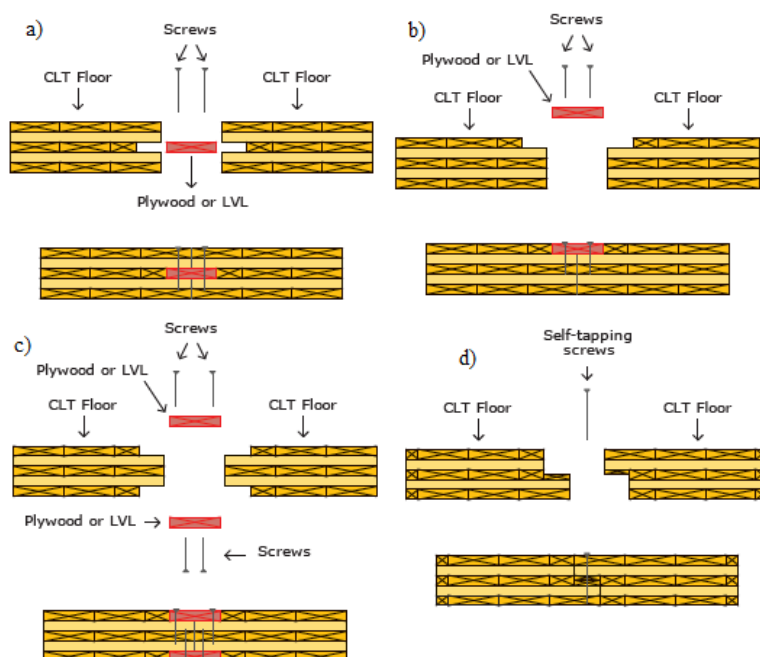


Figura 10: Uniones típicas entre paneles: a) Internal Spline, b) Single Surface Spline, c) Double Surface Spline, d) Half-Lapped Joint. (FPInnovations, 2011).

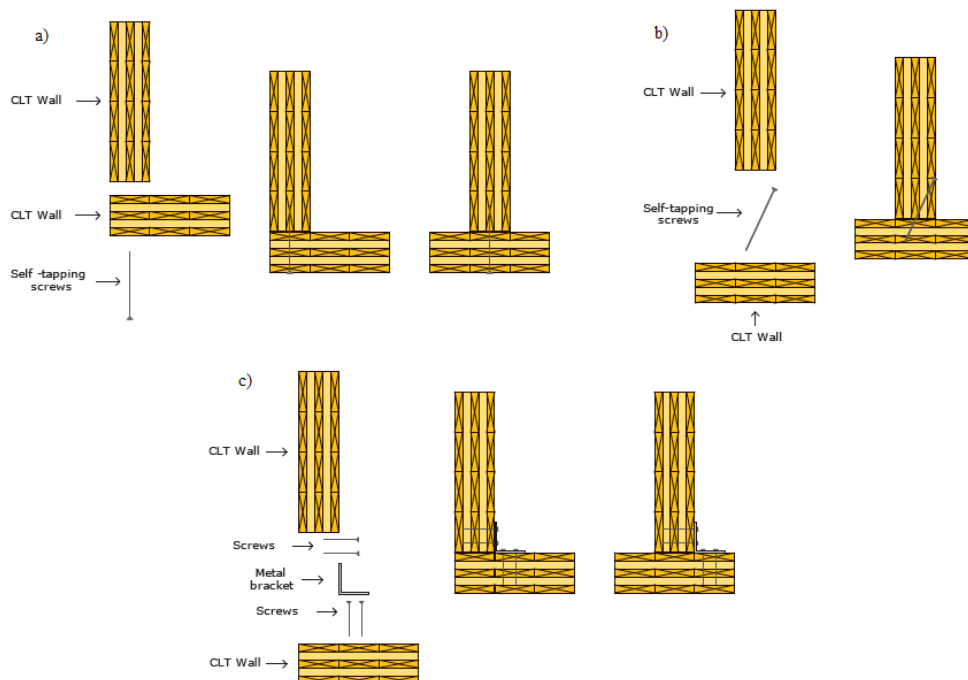


Figura 11: Unión perpendicular entre paneles: a) Tornillo Auto perforante ortogonal, b) Tornillo Auto perforante con ángulo, C) Union con ángulos metalicos.(FPInnovations, 2011).

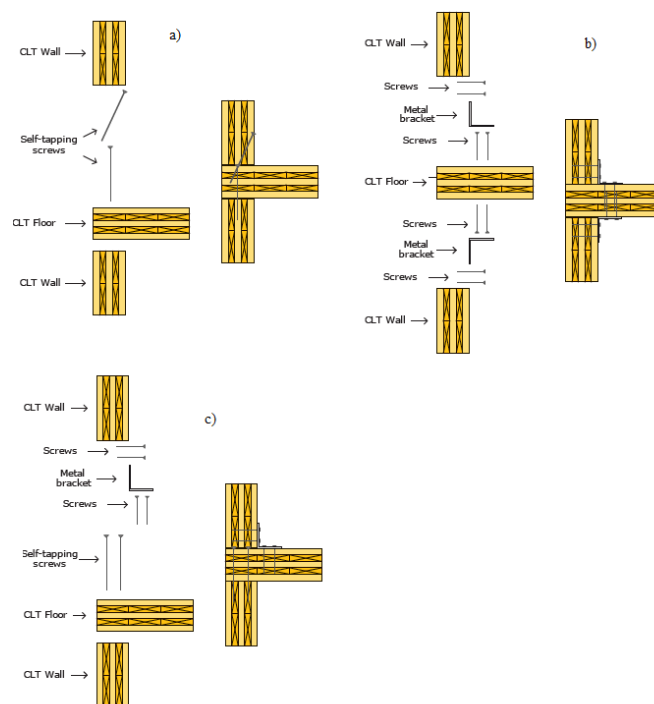


Figura 12: Unión entre paneles de muro y piso: a) Tornillo Auto perforante, b) Angulo Metálico, c) Unión Mixta. (FPInnovations, 2011).

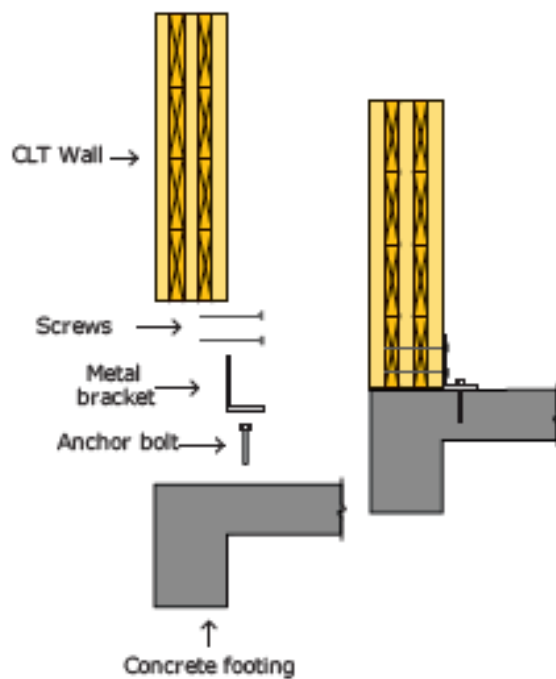


Figura 13: Unión muro de CLT - Fundación a través de conector metálico. (FPInnovations, 2011).

3. ENSAYO MECÁNICO

En el siguiente capítulo se desarrollaran las respectivas etapas que permitieron llevar a cabo el ensayo mecánico del sistema, destacando lo más relevante en el desarrollo de la presente memoria.

3.1 Configuración Estructural

El proyecto en cuestión presenta una configuración estructural de muro en madera contralaminada compuesta de dos niveles, presentando dimensiones de 2.60 metros de ancho y aproximadamente 4.00 metros de alto, visto desde su elevación frontal, y 1.20 metros de ancho con la misma altura, visto en elevación lateral, contemplando un área en planta por nivel de 3.12 m², con dimensiones de 2.60 metros en su dirección horizontal y 1.20 metros en la dirección vertical de la misma. En la Figura 14 se presenta la lámina de propuesta de los ensayos.

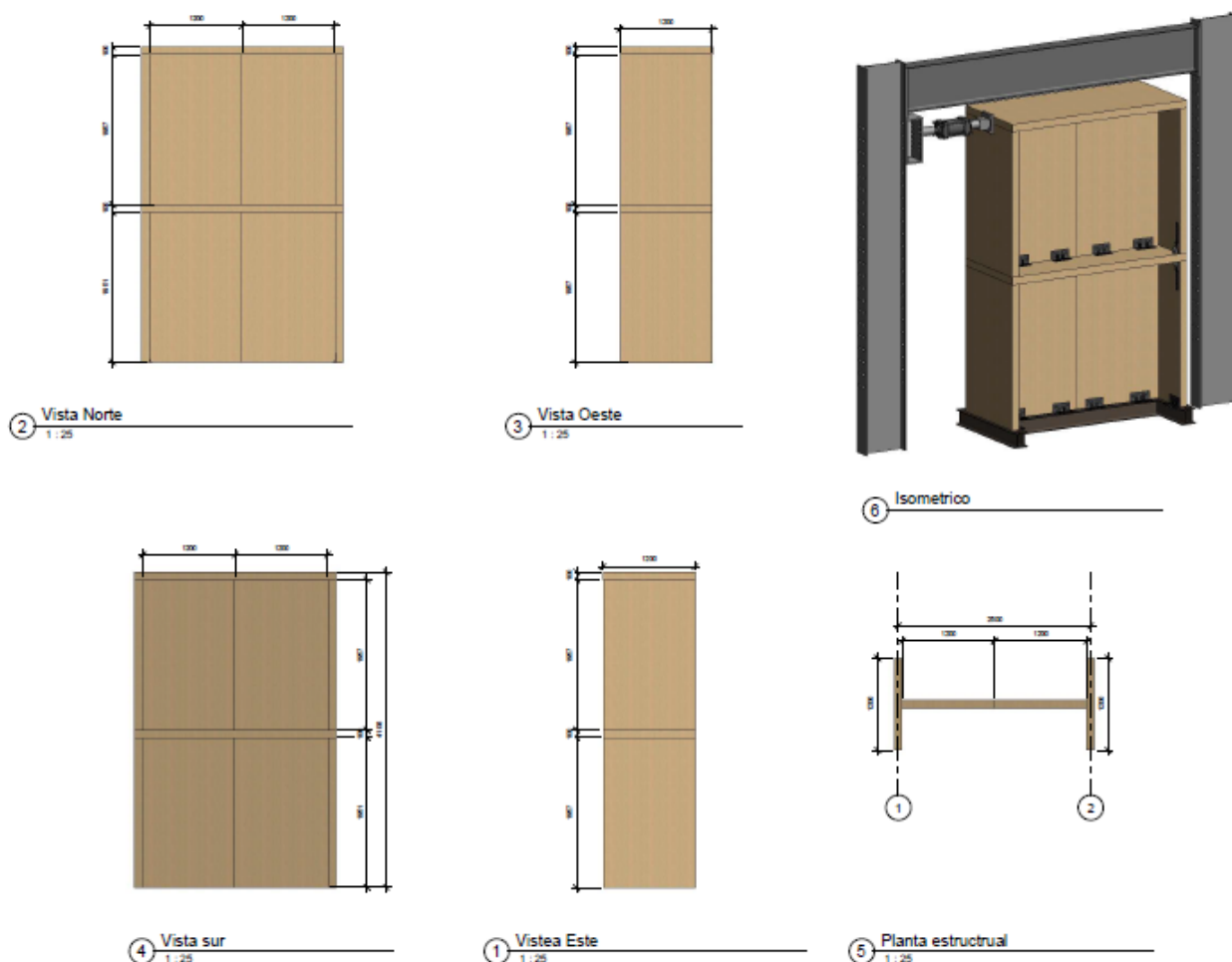


Figura 14: Lámina de Configuración Estructural de Ensayos (Jara, 2018).

3.2 Materiales

En el presente acápite se detallaran los materiales utilizados en los ensayos, comentando acerca de sus principales características y propiedades, tal que sean relevantes en el desarrollo de la presente memoria.

3.2.1 Paneles de CLT.

Los paneles de CLT fueron fabricados en las dependencias de la Universidad del Bio Bio, en el laboratorio de diseño y tecnología de la madera, los cuales están conformados de madera pino radiata de grado estructural visual G1 conforme a la normativa NCh 1207 of 2017, donde sus propiedades mecánicas provienen de la NCh 1198 of 2014. Su composición consta de 3 capas, teniendo un espesor total aproximado de 10 cm. Se fabricaron paneles tipo para muros y losas, de los cuales los primeros poseían dimensiones en elevación de 1.20 metros de ancho y 2.00 metros de altura y los del tipo losa presentan dimensiones de 1.20 metros de ancho y 2.60 metros de largo vistos en planta, los cuales pueden ser apreciados en la Figura 15.

Las propiedades mecánicas necesarias fueron determinadas, a través de métodos analíticos, obteniendo así sus módulos de elasticidad y módulos de corte, utilizando el método de Blass y Fellmoser.



Figura 15: Paneles de CLT (Elaboración Propia, 2019).

3.2.2 *Hold-Downs.*

En la configuración estructural se proyectan, tanto a nivel de anclaje de fundación como de unión muro-losa de entre piso, conectores metálicos del tipo Hold-Down, correspondientes al modelo HTT4 de la empresa Simpson Strong-Tie, los cuales tienen un ala de 32 cm de largo, con 18 perforaciones de 5 mm de diámetro, en su base presenta dimensiones de 6 cm de ancho por 3 cm de profundidad, teniendo en ella una perforación de 5/8" de pulgada de diámetro, la cual, equivale aproximadamente a 16 mm, permitiendo anclar el conector, con un perno o hilo metálico, según se dijo inicialmente.



Figura 16: Hold-Down HTT4 (Simpson Strong-Tie).

3.2.3 *Angle Brackets.*

Se proyectan igualmente, tanto a nivel de anclaje de fundación como de unión muro-losa de entre piso, conectores metálicos del tipo Angle Bracket, correspondientes al modelo ABR255 de la empresa Simpson Strong-Tie, los cuales presentan dos alas, una superior que consta de dimensiones de 26 cm de largo y 12 cm de alto aproximadamente, con 52 perforaciones de 5 mm de diámetro y dos perforaciones de 14 mm de diámetro, y el ala inferior consta de dimensiones de 26 cm de largo y 10 cm de profundidad, con 41 perforaciones de 5 mm de diámetro y 4 de 14 mm de diámetro, siendo estos últimos diámetros superiores en ambas alas las que permiten lo que es el traspaso de una barra o hilo metálico, permitiendo anclar el conector según se dijo inicialmente.

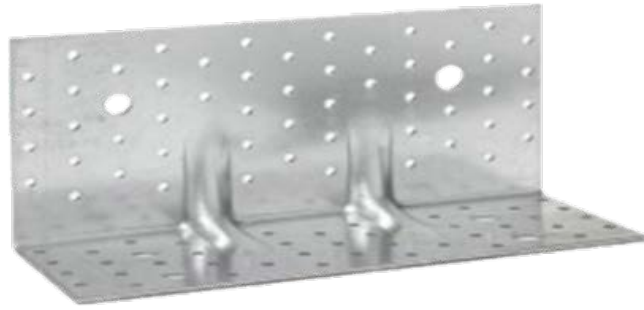


Figura 17: Angle Bracket ABR255 (Simpson Strong-Tie).

3.2.4 Clavos Anulares.

Para la fijación, hacia la madera, de los conectores metálicos expuestos anteriormente, se proyecta el uso de puntas anilladas electrocincadas, correspondientes al modelo CNA 4,0x60 de la empresa Simpson Strong-Tie, los cuales tienen dimensiones de diámetro de cabeza de 8 mm, diámetro de vástago de 4 mm y una longitud de 6 cm.



Figura 18: Clavos Anulares CNA 4x60 (Simpson Strong-Tie).

3.2.5 Tornillos Largos.

Para las uniones, tanto en encuentros perpendiculares de muros como en las uniones de muro-losa, se proyecta el uso de tornillos largos del tipo auto perforante, correspondiente al modelo SDWS22800 de la empresa Simpson Strong-Tie, los cuales tienen dimensiones de diámetro de cabeza de 19 mm, diámetro del vástago de 6 mm y una longitud de 20 cm aproximadamente.



Figura 19: Tornillo SDWS22800 (Simpson Strong-Tie).

3.2.6 Tornillos Junta Vertical.

Para las unión del tipo muro-muro en paralelo, la cual se le denominara junta vertical, se proyecta el uso de tornillos para madera en exterior, correspondiente al modelo DSVT3R de la empresa Simpson Strong-Tie, los cuales tienen dimensiones de diámetro del vástago de 5 mm y una longitud de 76 mm aproximadamente.



Figura 20: Tornillo DSVT3R (Simpson Strong-Tie).

3.3 Herramienta Computacional y Análisis Empleados

Para realizar el diseño del ensayo mecánico, se recurrió al software de análisis de elementos finitos SAP 2000, el cual posee un interfaz gráfica 3D amistosa para el usuario, quien realiza la modelación geométrica en él, permitiéndonos ejecutar distinto tipos de análisis en nuestras estructuras, introduciendo previamente parámetros de materiales con sus respectivas propiedades mecánicas, secciones ya sea de muros, losas y además caracterización nuestras conexiones. Posterior a una modelación y ejecución de los correspondientes análisis, el software permite la obtención y visualización de resultados de diversas formas, ya sea a través del mismo modelo en la interfaz gráfica, o a través de tablas y curvas correspondientes. A continuación se relatan los aspectos más importantes a modelar.

3.3.1 Modelo de Paneles.

En primera instancia se procedió a la modelación de la estructuración de muros y losas. Para ello se introducen las propiedades mecánicas del material a utilizar, en este caso, madera. Se le asignan las características de un material ortotrópico y las propiedades mecánicas se obtienen de manera analítica desde literatura, como fue explicado en el apartado de materiales. Estos últimos son ilustrados en la Tabla 1, cuyos cálculos serán incluidos en el Anexo A. Se definieron las secciones correspondientes, vale decir, los paneles de muros y losas de CLT como elementos del tipo Shell, siendo estos de tres capas, dándoles un espesor final de 10 cm.

	MUROS CLT 3 CAPAS	LOSAS CLT 3 CAPAS	
E0	6777,778	8925,926	MPa
E90	3555,556	1407,407	MPa
G0	625,000	625,000	MPa
G90	62,500	62,500	MPa

Tabla 1: Módulos de Elasticidad y Cortante de Paneles de CLT (Elaboración Propia).

La etapa final del modelamiento de los paneles culmina con la discretización de los elementos por medio del mallado de elementos finitos, con afán de obtener resultados con una mayor precisión, a través de una solución numérica más aproximada en los análisis correspondientes.

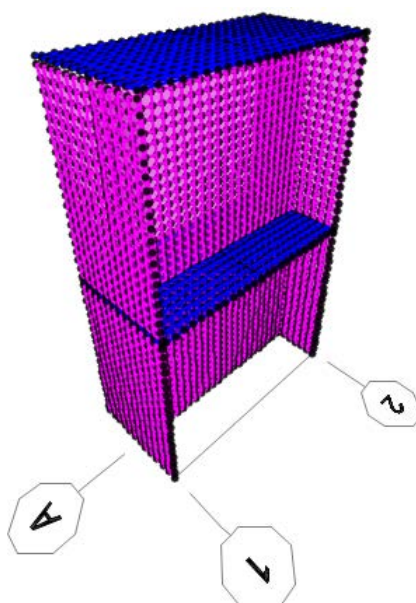


Figura 21: Modelo de Paneles de CLT (Elaboración Propia, 2019).

3.3.2 Modelo de Conectores y Uniones.

Respecto a la modelación de los elementos de conexión y los diferentes tipos de unión a ejecutar, se utilizaron elementos del tipo Link, tanto de 1 nudo a nivel de fundación, como de 2 nudos para todas las otras uniones. Adicionalmente, se modela el fenómeno no lineal de contacto entre paneles, a modo de restringir el traspaso de un panel hacia otro, con un elemento de link llamado Gap, al cual se le asignan propiedades de rigidez axial en una sola dirección de una magnitud suficiente tal que se modele el fenómeno de manera correcta. Todas las conexiones entre paneles se pueden apreciar en la Figura 22.

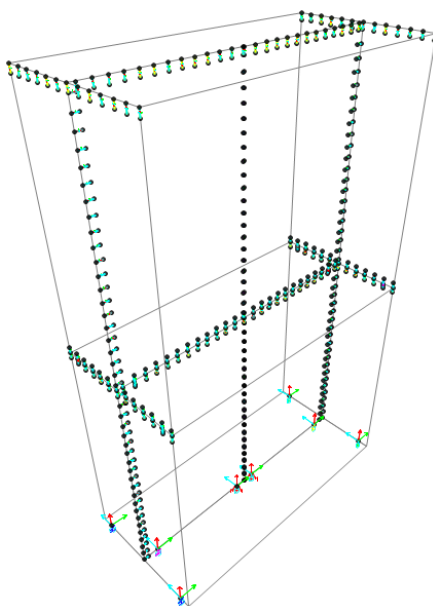


Figura 22: Modelo de Conexiones en Paneles de CLT (Elaboración Propia, 2019).

Para caracterizar, se utiliza un arreglo trilineal de Fuerza vs Desplazamiento, correspondiente a una aproximación no lineal de las curvas de histéresis de cada conexión como se muestra en la Figura 23, todas ellas obtenidas de la literatura de ensayos mecánicos de estas mismas, donde en un solo caso correspondía a la caracterización mecánica exacta de las uniones, cuyos datos serán expuestos en el Anexo B. Específicamente, para los conectores del tipo placa metálica, la caracterización de todos los Hold-Downs, se adaptado del ensayo mecánico del modelo WHT340 con 20 clavos (Casagrande et al., 2016) como se muestra en la Figura 24.

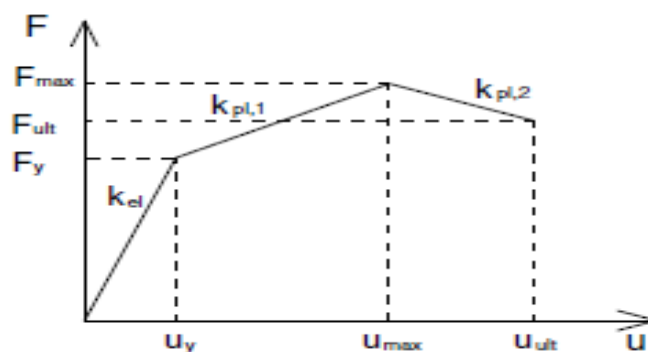


Figura 23: Aproximación No Lineal de Fuerza v/s Desplazamiento (Gavric, 2015b).

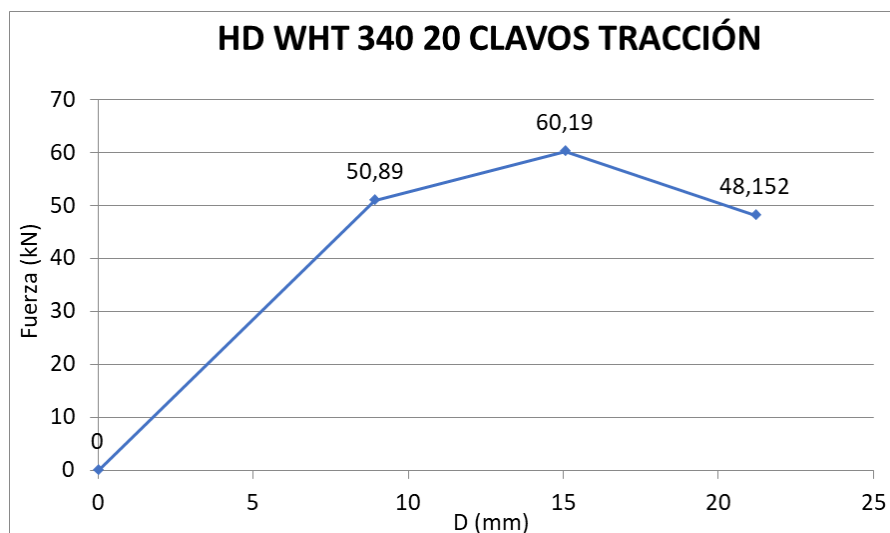
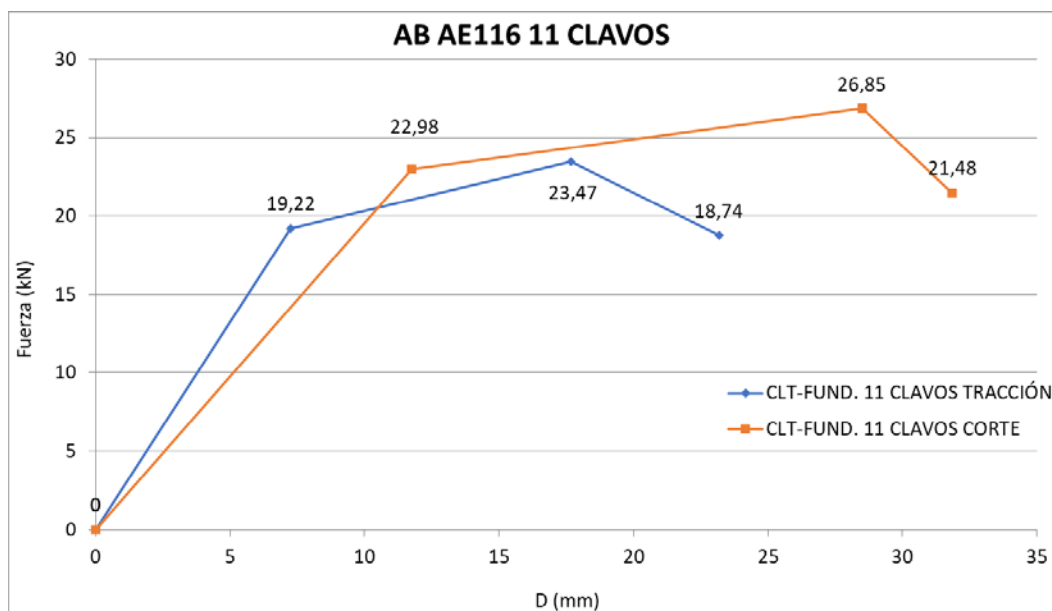


Figura 24: Arreglo Trilineal Hold Down WHT340 (Elaboración Propia, 2019).

En el caso de los Angle Bracket, para el anclaje a nivel de fundación, se adaptó del ensayo mecánico del modelo AE116 con 11 clavos tanto a tracción como en cortante (Gavric et al., 2014). Por otro lado, para la unión muro-losa, se adaptó del ensayo mecánico del modelo TTN240 con 12 clavos tanto a tracción como en cortante (Parra, 2017) como se muestran en la Figura 25.



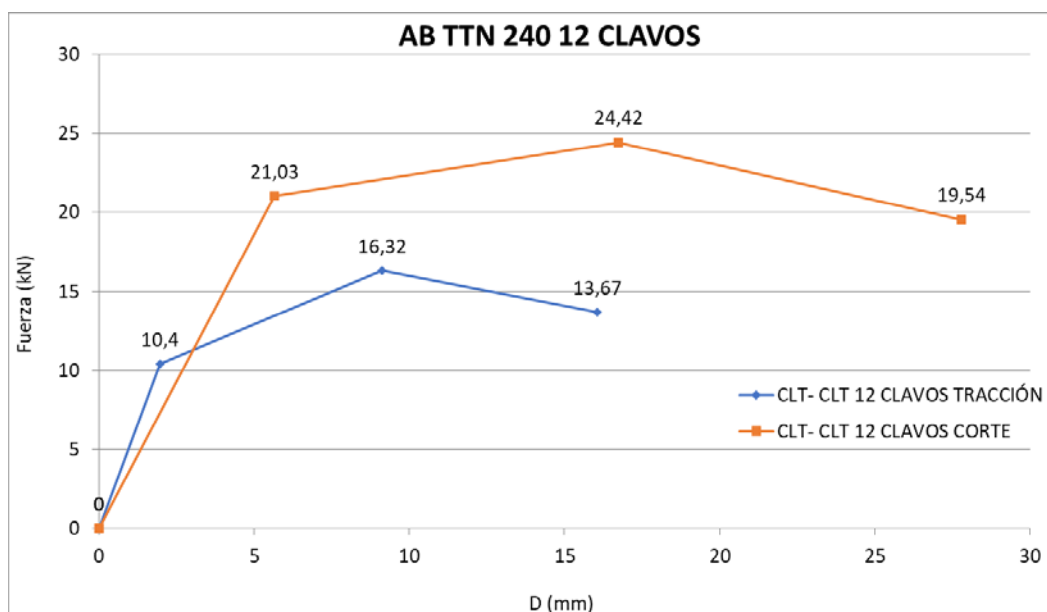


Figura 25: Arreglo Trilineal Angle Bracket AE116 (Superior) y TTN240 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).

Por otro lado, para las uniones atornilladas, en el encuentro perpendicular de muros, se adaptó del ensayo mecánico de un tornillo HBS $\phi 10 \times 180$, en todas sus direcciones (Gavric et al., 2015a), como se muestran en la Figura 26.

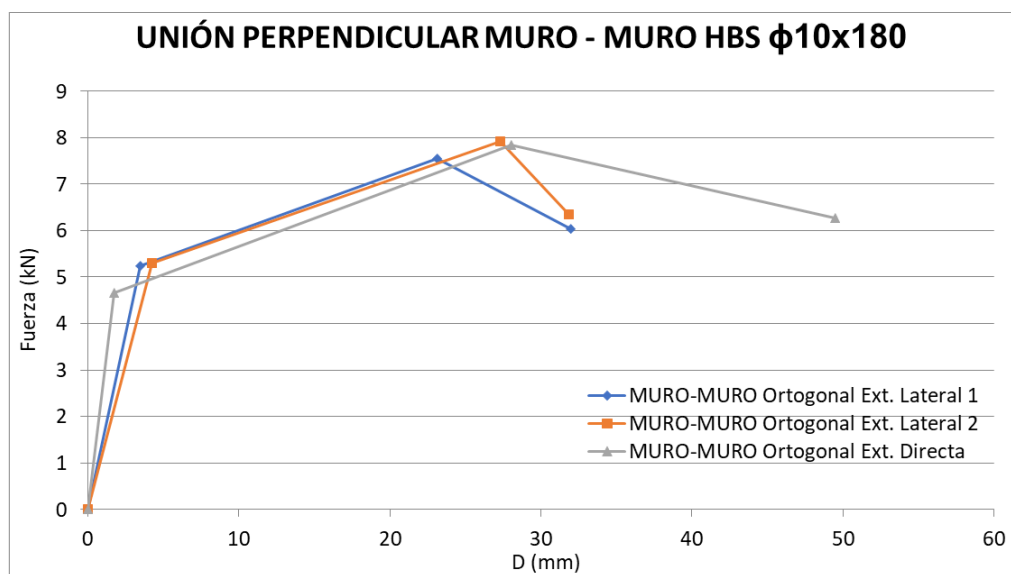


Figura 26: Arreglo Trilineal Unión Perpendicular Muro-Muro (Elaboración Propia, 2019).

Para la unión atornillada entre muro-losa, se adaptó del ensayo mecánico de un tornillo HBS $\phi 10 \times 260$, en todas sus direcciones (Gavric et al., 2015a), como se muestran en la Figura 27.

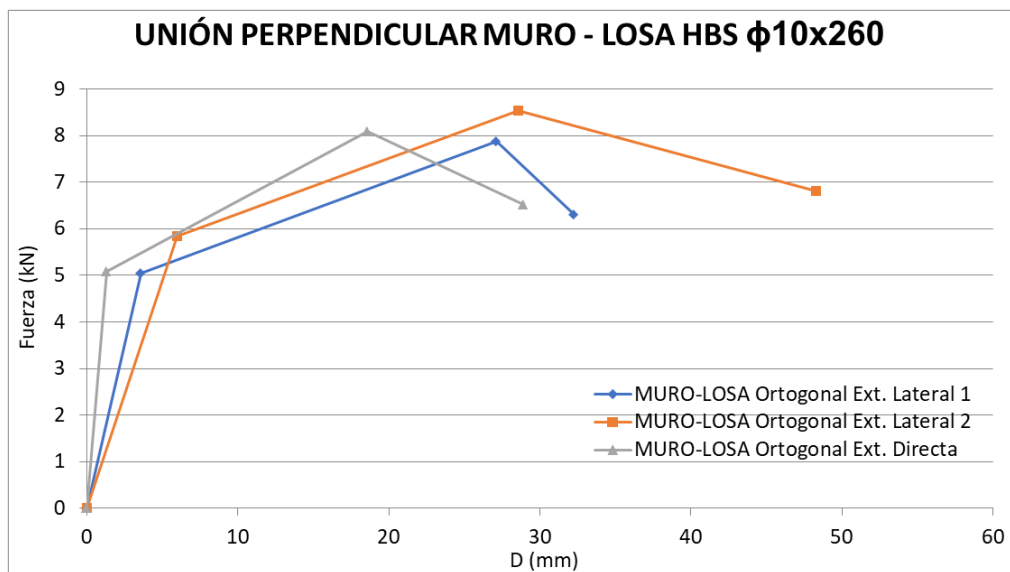


Figura 27: Arreglo Trilineal Unión Perpendicular Muro-Losa (Elaboración Propia, 2019).

Para la unión atornillada entre muros paralelos, se utilizó el ensayo mecánico del mismo tornillo empleado (Asparren, 2019), es decir, del modelo DSVT3R, en una de sus direcciones (Extracción Lateral Paralela). Para los valores de extracción lateral perpendicular, se utilizaron los de la literatura correspondiente a un tornillo HBS $\phi 8 \times 80$ (Gavric et al., 2015a), como se muestran en la Figura 28.

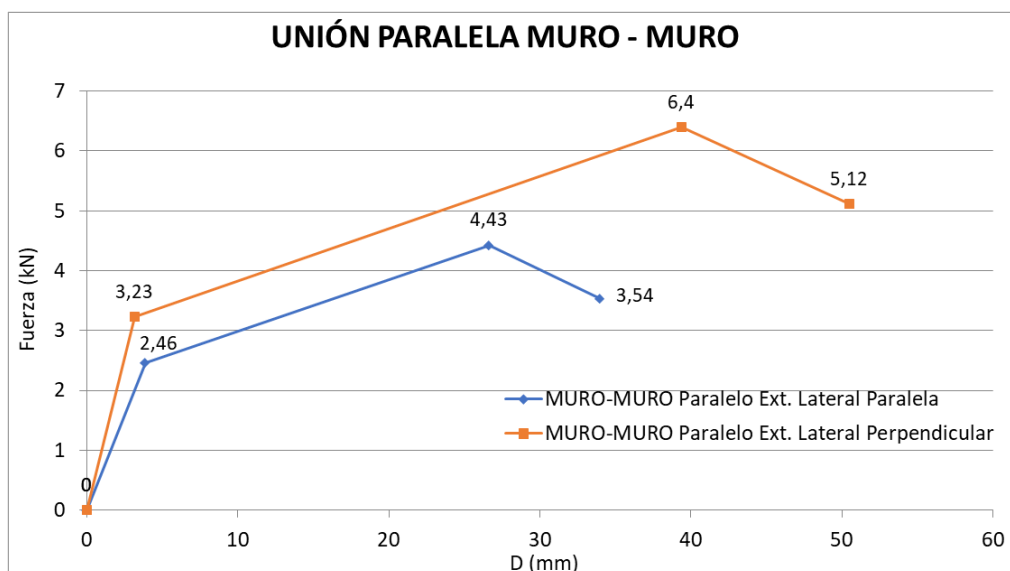


Figura 28: Arreglo Trilineal Unión Paralela Muro-Muro (Elaboración Propia, 2019).

3.3.3 Análisis Estático No Lineal: PushOver.

A modo de diseño del ensayo mecánico y con finalidad de prever que este mismo tuviera un comportamiento asimilable, tal que nos permitiese obtener la mayor cantidad de información posible y visualizar distintos tipos de mecanismos de falla, es decir, que no se produjese un rechazo del ensayo por falta de información, se procedió a ejecutar análisis estático no lineal conocido como pushover, el cual está controlado por la aplicación de una carga lateral en los centros de masa de cada nivel, en forma de triángulo invertido, con la finalidad de conocer el comportamiento en el rango no lineal de la estructura. El análisis inicia a partir de un estado anterior de deformaciones, provenientes de un análisis de cargas gravitacionales, donde luego interactúan en la estructuras las cargas laterales incrementales, en cada paso de análisis, donde el objetivo final es visualizar la formulación de rotulas plásticas en la estructura y obtener una relación de la estructura de cortante basal v/s el desplazamiento lateral a nivel de techo. En el caso del diseño del ensayo mecánico, se asignó una carga a nivel de techo, como sería el caso real de la aplicación del pistón hidráulico, correspondiente a la magnitud del peso sísmico de la estructura.

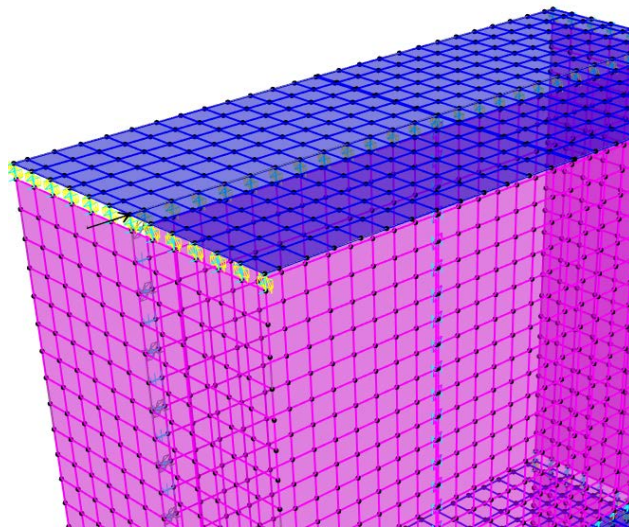


Figura 29: Carga Lateral en Modelo Numérico (Elaboración Propia, 2019).

3.3.4 Casos de Estudio.

Para concluir la etapa, luego de una serie de análisis iterativos, se presentaron las configuraciones de las probetas, dentro de las cuales se diseñó la cantidad de sujeciones en cada conector metálico y el patrón de separación de tornillos en cada una de las juntas correspondientes, dando así el paso a dos casos de estudio, las cuales se les denominara Ensayo N°1 y Ensayo N°2. La probeta de Ensayo N°1 consta de lo que es conectores metálicos del tipo Hold-Down en sus esquinas, tanto a nivel basal como a nivel de entrepiso, en su vista frontal y laterales, y además de conectores metálicos del tipo Angle Bracket situados centralmente tanto a nivel basal como a nivel de entre piso, en la vista frontal de la probeta. Por otro lado el patrón de separación de tornillos para el encuentro perpendicular entre muros fue de un tornillo cada 20 cm insertados a 45° dentro de un plano vertical, para la junta vertical fue de dos tornillos cada 10 cm y en la unión muro-losa, fue de 1 tornillo cada 10 cm. En el caso de la probeta de Ensayo N°2, se presentan dos cambios principalmente. Uno de ellos es la variación espacial de los conectores, es decir, la disposición geométrica de cada uno de ellos en el plano y el otro es la implementación de conectores metálicos del tipo Angle Bracket tanto a nivel basal como a nivel de entrepiso en la vista frontal de la probeta, tal y como se representa en la Figura 30. La Tabla 2 muestra el número de fijaciones empleados en cada conector.

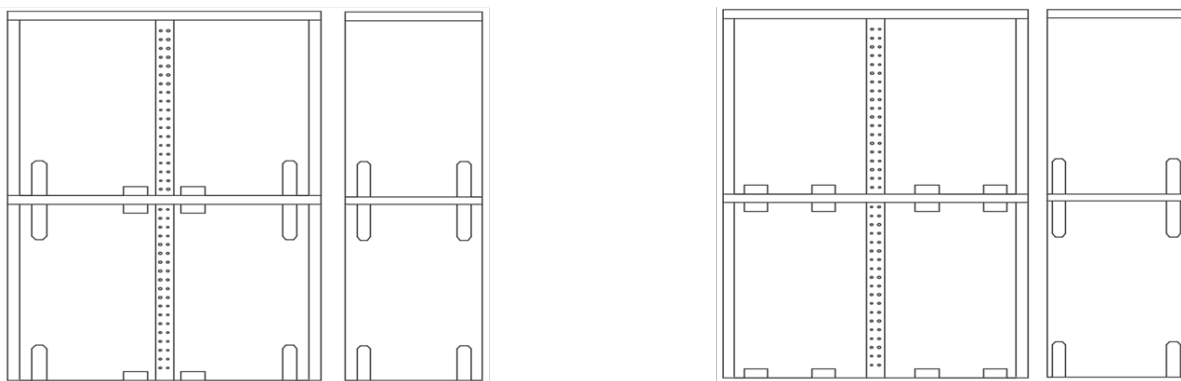


Figura 30: Vista frontal y Laterales de Configuración de Probetas, Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha) (Elaboración Propia, 2019).

Ensayo N°1	Numero de Clavos		
	Base	Losa Lado Inferior	Losa Lado Superior
Hold Down	18	18	9
Angle Bracket	40	35	35

Ensayo N°2	Numero de Clavos		
	Base	Losa Lado Inferior (Extremos/Centro)	Losa Lado Superior (Extremos/Centro)
Hold Down	18	18	9
Angle Bracket	40	40/35	40/35

Tabla 2: Numero de Fijaciones en conectores de Probetas según Diseño de Ensayo Mecánico (Elaboración Propia, 2019).

3.4 Ensayo de Carga Lateral

El ensayo mecánico para caracterizar el sistema constructivo consta en la aplicación de una carga lateral, proveniente de un pistón hidráulico instalado en un marco de carga, hacia la losa del segundo nivel. Para clarificar el procedimiento a seguir, se procede a una serie de apartados.

3.4.1 Montaje de Probeta

El montaje de las configuraciones de probetas fue realizado en conjunto por el personal de Laboratorio del Área Estructural del CITEC UBB y del Laboratorio de Diseño y Tecnología de la Madera, todo ello en las dependencias de la Universidad del BioBio, específicamente en el Laboratorio del Área Estructural del CITEC UBB. Fueron llevadas a cabo cada una de las uniones previstas en el apartado Casos de Estudio. El tiempo de montaje aproximado fue de tres días para cada probeta, donde se procedió a montar inicialmente por la parrilla de anclaje para luego ir avanzando por nivel desde el inferior hasta el superior, iniciando por el anclaje hacia la fundación, la unión en encuentros de muro perpendicular, junta vertical y finalmente ensamblando la losa de cada nivel.



Figura 31: Probeta de Ensayo N°1 Montada (Elaboración Propia, 2019).

3.4.2 Protocolo de Ensayo

El protocolo de ensayo básicamente fue controlado por lo que es un protocolo de carga, el cual toma como referencia la normativa NCh 802 of 2017, la que indica que se debe aplicar una carga cíclica no reversible, en intervalos crecientes de carga. La carga empuja a la estructura hasta un cierto límite, la mantiene en un cierto tiempo y luego la libera, dejando en vibración libre, es decir, en ningún momento la estructura tiene una vuelta forzada. Esto nos da paso a lo que son gráficos aproximados tanto de protocolo de carga como curvas características, correspondientes a las Figuras 32 y 33 respectivamente.

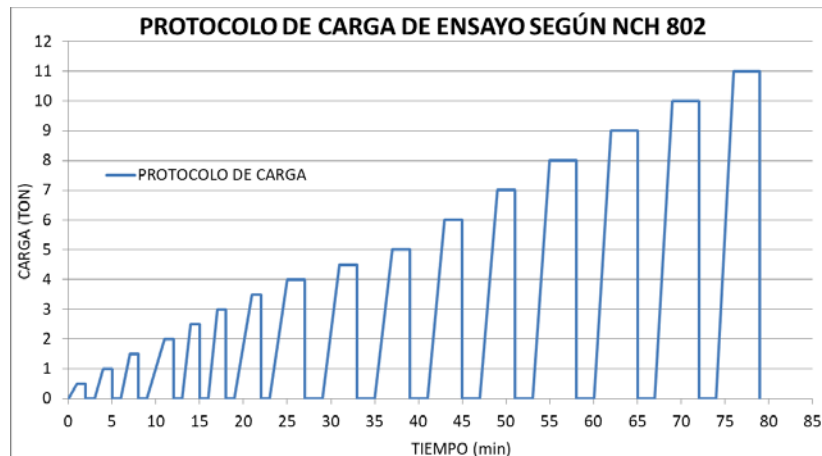


Figura 32: Protocolo de Carga Aproximado de Ensayos (Elaboración Propia, 2019).

En el caso del protocolo de carga, se inició el ensayo con ciclos de carga de 0.5 Toneladas, ciclos los cuales se fueron repitiendo desde el reposo hasta las 5 Toneladas de carga. Posterior a ello, se aumentó la magnitud de carga de manera proporcional, al doble de la magnitud de los ciclos iniciales, es decir, a 1 Tonelada, teniendo este aumento desde las 5 hasta las 11 toneladas aproximadamente o bien, la carga en estado último de la estructura. En cuanto a las curvas características que nos arroja el equipamiento, se aprecia lo que es un desplazamiento residual en la estructura, lo cual es atribuido a fenómenos no lineales que hacen que nuestra estructura no pueda volver a su posición original en el rango elástico. A medida que va aumentando la magnitud de los ciclos de carga e incursionando en los rangos no lineales de nuestra estructura, el desplazamiento residual va aumentando como se puede observar en la curva tipo.

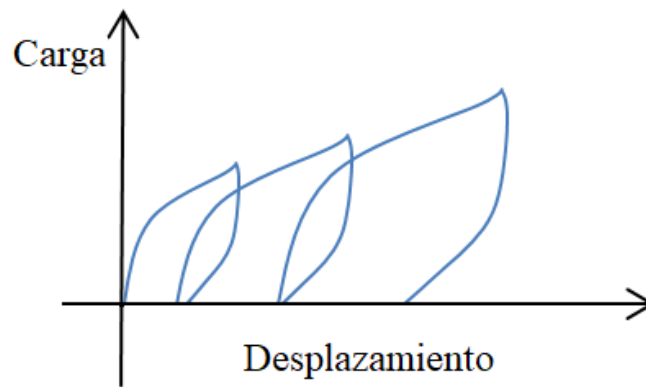


Figura 33: Curva Tipo Resultado del Protocolo de Carga (Elaboración Propia, 2019).

3.4.3 Adquisición de Datos

La recopilación de los resultados de los ensayos fue a través de los transductores provenientes del equipamiento del Laboratorio de ensayo y de otros conectados de forma externa hacia un equipo registrador de datos (Datalogger). El orden de los transductores o canales de medición para ambos ensayos es presentado en la Figura 34, los que prosiguen un orden numérico el cual será explicado en la Tabla N°4. Cabe señalar que todos los canales fueron implementados en ambos ensayos, salvo el #1 y #2, incorporados únicamente en los Ensayos N°1 y N°2 respectivamente. Los rectángulos de color rojo corresponden a sismógrafos (triaxiales), cada uno situado en una losa de la estructura, con afán de medir la frecuencia instantánea, en ambos ensayos.

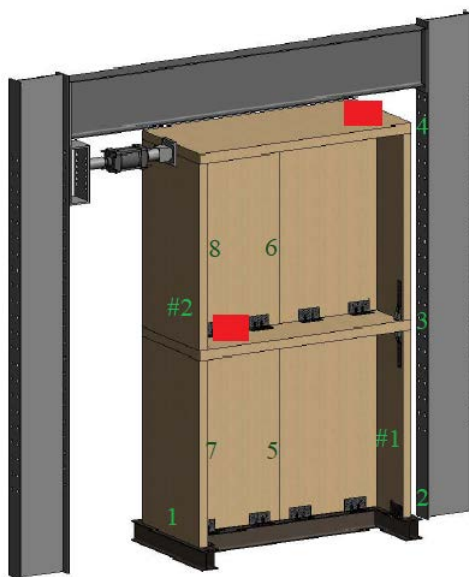


Figura 34: Posición de Transductores y Sismógrafos (Elaboración Propia, 2019).

Nº Canal	Medición
1	Levantamiento de Cabecera en Tracción a Nivel Basal.
2	Deslizamiento a Nivel Basal en Interfaz Muro – Sistema de Anclaje.
3	Desplazamiento Lateral de la Losa del Primer Nivel.
4	Desplazamiento Lateral de la Losa del Segundo Nivel.
5	Desplazamiento Relativo en la Junta Vertical del Primer Nivel.
6	Desplazamiento Relativo en la Junta Vertical del Segundo Nivel.
7	Deslizamiento Relativo Encuentro Perpendicular en Tracción del Primer Nivel.
8	Deslizamiento Relativo Encuentro Perpendicular en Tracción del Segundo Nivel.
#1	Deslizamiento Relativo Encuentro Perpendicular en Compresión del Primer Nivel.
#2	Levantamiento de Cabecera en Tracción del Segundo Nivel.

Tabla 3: Canales de Medición Empleados en Los Ensayos (Elaboración Propia, 2019).

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

A continuación se presenta un desglose de los resultados, donde se emitieron comentarios al respecto de lo observado en la ejecución y resultados de los ensayos. Se irán emitiendo los comentarios de cada una de las probetas de manera secuencial. Algunos datos, curvas y/o figuras de resultados serán presentados en el anexo correspondiente.

4.1 Curva de Capacidad.

La curva de capacidad o respuesta del sistema se obtiene de la medición de la fuerza aplicada en cada instante y del desplazamiento lateral de la losa de techo de la estructuración, correspondiente al Canal N°4 de la Tabla 3. De ella se puede obtener información relevante respectiva a la probeta del sistema como lo son características del rango elástico (Fuerza y Desplazamiento de Fluencia), y del rango inelástico (Desplazamiento Máximo, Fuerza Máxima, Desplazamiento Ultimo y Fuerza Ultima). En el caso del Ensayo N°1, el estado último en ningún momento representa el estado ultimo real debido a una falla o colapso en la estructuración, más bien es debido a una limitación del equipamiento. Caso contrario es el del Ensayo N°2, donde el estado último es alcanzado debido a una falla localizada, la cual será evidenciada en su apartado correspondiente.

En la curva de capacidad del sistema, mostrada en la Figura 35, se aprecia una envolvente con una serie de pendientes, destacando una pendiente inicial bastante pronunciada. Se observan todos los ciclos de carga y descarga, con forma similar a la explicada en el apartado de protocolo de ensayo, donde cada ciclo de carga fue dejando un desplazamiento residual creciente conjunto crecía la carga.

La pendiente inicial puede producir una interpretación de falsa fluencia, que nos llevaría creer que el sistema está fluyendo cuando en realidad no, por lo que se procedió al análisis de los canales locales, donde finalmente con este análisis complementario, esta se le atribuyó al fenómeno del roce que presenta el sistema inicialmente, debido a los grandes niveles de carga y bajos niveles de desplazamientos alcanzados. Se aprecia que en cada ciclo de recarga, la pendiente, cuya representación es la rigidez, es más suave, sin embargo, en ningún momento ésta compromete la capacidad del sistema. Se presenta en la Tabla 4 un resumen de los resultados característicos extraídos de la curva del sistema.

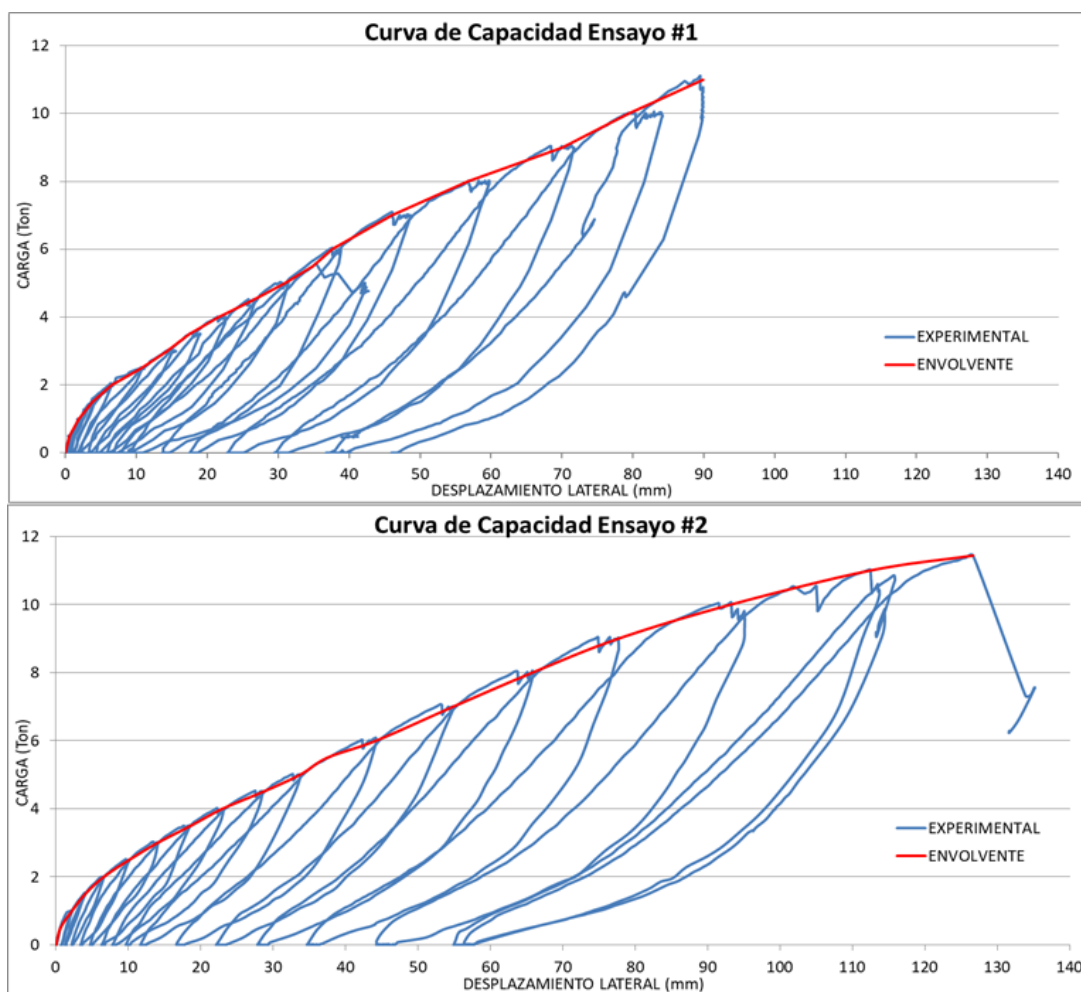


Figura 35: Curva de Capacidad del Sistema Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).

	Ensayo	
	N°1	N°2
Fy (Ton)	7	6
Dy (mm)	45	44
Kel (Ton/mm)	0.156	0.136
Fmax. (Ton)	11.12	11.44
Dmax. (mm)	89.94	126.64
Fult. (Ton)	11.12	11.44
Dult. (mm)	89.94	126.64
μ Dult.	2.00	2.88

Tabla 4: Resumen de Resultados Característicos del Sistema (Elaboración Propia, 2019).

4.2 Deslizamiento Basal

El deslizamiento basal, referido al Canal N°2 de la Tabla 3, busca medir la demanda de corte en los conectores asociados. Se puede apreciar en sus curvas presentadas en la Figura 36, que en estado último, los niveles de desplazamiento alcanzados son bastante bajos, indicando que en todo momento se mantienen en rango lineal, por lo que no se sufren daños inelásticos. Por otro parte, en la probeta Ensayo N°1, sólo se observa un aplastamiento del perno de anclaje, infiriendo que la junta vertical tuvo un comportamiento dúctil, dado que cada uno de los paneles de muro se comportó como si fuese un panel por sí solo, es decir, una esquina estaba sometida a tracción y la otra a compresión. Caso distinto fue la probeta Ensayo N°2, donde el aplastamiento del perno de anclaje fue menor, y se apreció un levantamiento continuo del muro completo a nivel basal, lo que implica un comportamiento menos dúctil en la junta vertical del sistema.

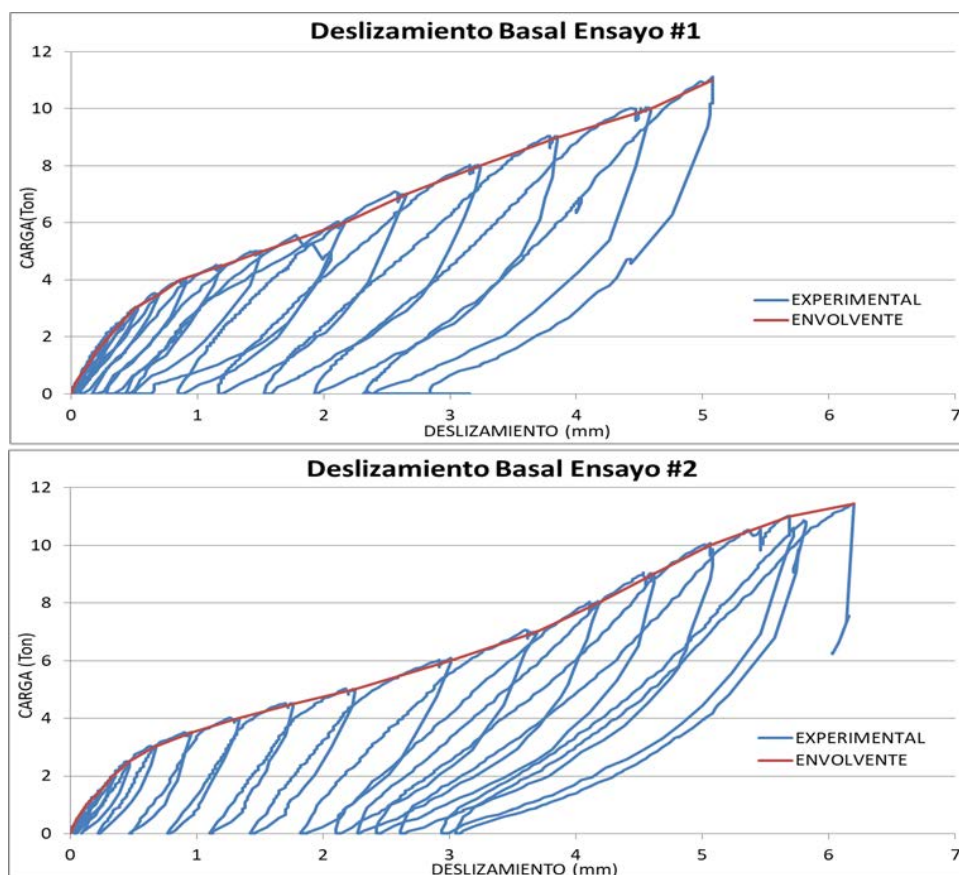


Figura 36: Curva de Deslizamiento Basal Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).

4.3 Deslizamiento Relativo en Encuentro Perpendicular en Tracción.

El deslizamiento relativo en el encuentro perpendicular en tracción, referido a los Canales N°7 y 8 de la Tabla 3, busca medir la demanda en extracción lateral de los conectores asociados. Se puede apreciar en sus curvas presentadas en la Figura 37, que en estado último, los niveles de desplazamiento alcanzados son bastante bajos, según muestra la caracterización mecánica de un tornillo HBS de similares características, tomados como valores referenciales de estudio (Casagrande et al., 2016). Esto nos indica que en todo momento se mantienen en rango lineal, por lo que no se sufren alguna extracción o daño visible tanto en la probeta Ensayo N°1 y Ensayo N°2.

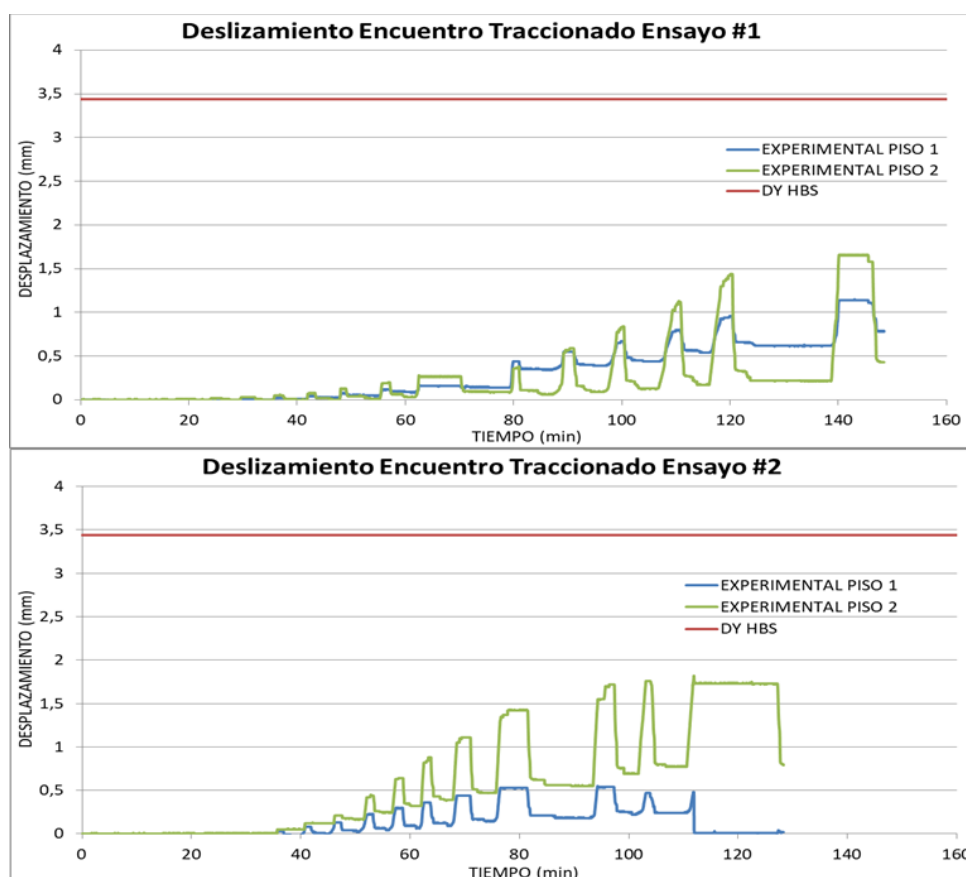


Figura 37: Curva de Deslizamiento Relativo en Encuentro Perpendicular en Tracción Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).

4.4 Levantamiento de Cabecera en Tracción.

El levantamiento de la cabecera en tracción, referido al Canal N°1 de la Tabla 3, busca medir la demanda axial de los conectores asociados. Se puede apreciar en sus curvas presentadas en la Figura 38, que en estado último, los niveles de desplazamiento alcanzados son bastante altos,

tomando como referencia la caracterización mecánica de un Hold-Down de similares características (Casagrande et al., 2016). Esto nos indica que los conectores asociados a la esquina medida incursionan en el rango no lineal, por lo que sufren grandes niveles de daño tanto para la probeta Ensayo N°1 y Ensayo N°2, siendo en esta última inclusive una falla que ocasiono el estado último de la experiencia. Los niveles de daño serán caracterizados posteriormente con el parámetro denominado Ductilidad.

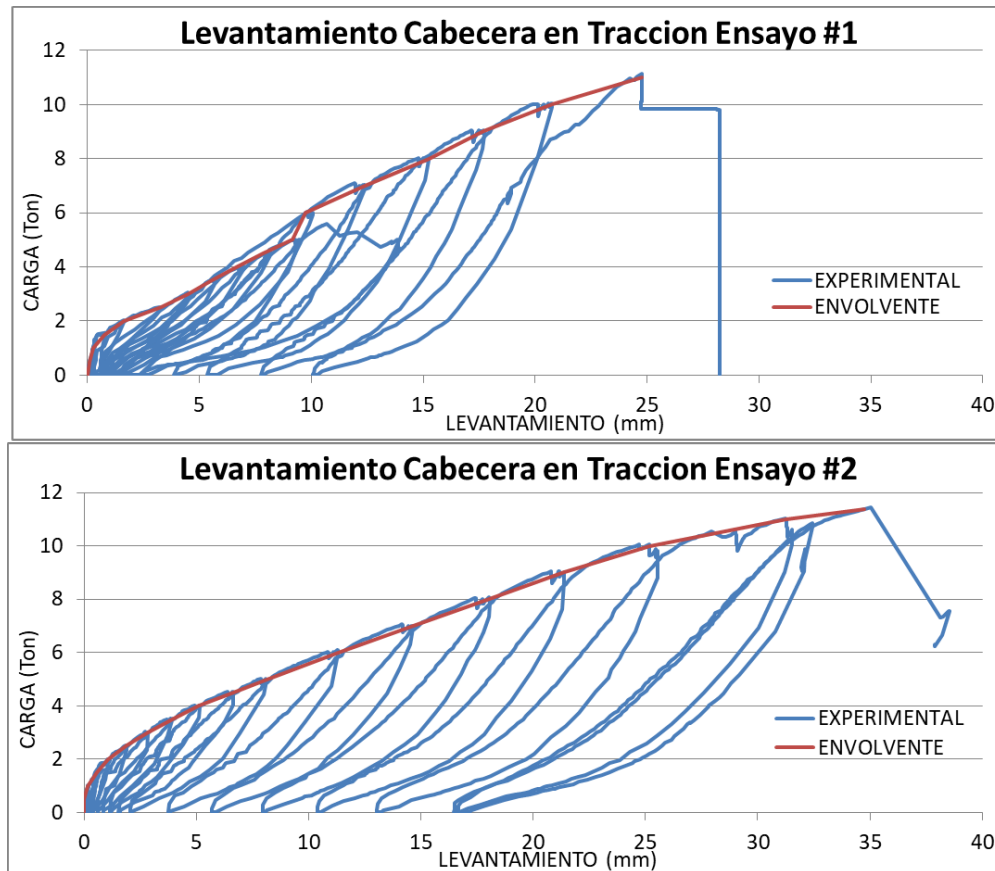


Figura 38: Curva de Levantamiento de Muro Cabecera en Tracción Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).

4.5 Desplazamiento Relativo en Junta Vertical.

El desplazamiento relativo en la junta vertical, referido a los Canales N°5 y 6 de la Tabla 3, buscaba medir los diferentes modos de demanda en los conectores asociados. Se puede apreciar en sus curvas presentadas en la Figura 39, que en estado último, los niveles de desplazamiento alcanzados son bastante altos, tomando como referencia la caracterización mecánica de la misma. (Asparren, 2019). Esto nos indica que los tornillos incursionan en el rango no lineal, por lo que

sufren grandes niveles de daño tanto para la probeta Ensayo N°1 y Ensayo N°2, sin embargo, en ningún momento compromete la estabilidad global de la estructura.

En la Figura 40, se representa lo expuesto en el apartado del Deslizamiento Basal, donde para el Ensayo N°1, se observa el comportamiento de junta vertical como Muro Acoplado, y en el Ensayo N°2, se afirma el levantamiento continuo a nivel basal, por lo que la junta tiene un comportamiento intermedio, según lo estudiado por Igor Gavric, en su caracterización cíclica de elementos de muro de CLT (Gavric, 2015b).

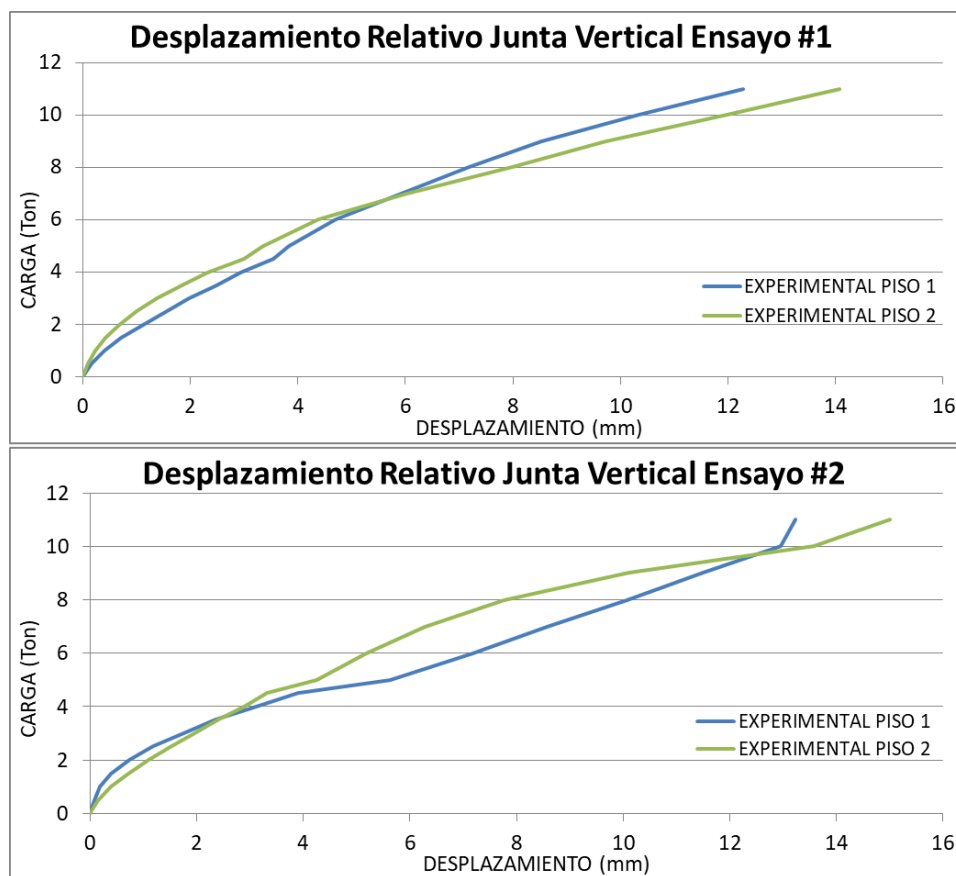


Figura 39: Curva de Deslizamiento Relativo en Junta Vertical Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).



Figura 40: Estado Ultimo Junta Vertical Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha) (Elaboración Propia, 2019).

4.6 Frecuencias Instantáneas.

Los sismógrafos empleados en cada una de las losas de la estructura, buscaban medir la frecuencia instantánea en vibración libre. Se puede apreciar en la Figura 43, una curva que presenta en el eje vertical la frecuencia instantánea y en el horizontal el tiempo del ensayo. Los picks más altos en cada una de las curvas se dan en el tiempo de cero minutos, las cuales representan a la frecuencia inicial del sistema. En un instante dado, se aprecia una caída bastante evidente, cuya frecuencia está asociada a la aplicación de la carga en ese instante. Luego, cuando el pistón es descargado, la frecuencia instantánea incrementa, sin embargo, en ningún momento alcanza los niveles de frecuencia inicial, dando a entender que obedece a la teoría de daño en las estructuras, la cual indica que a medida que una estructura sufre daños, su periodo aumenta de la estructura, tal y como se aprecia en la experiencia.

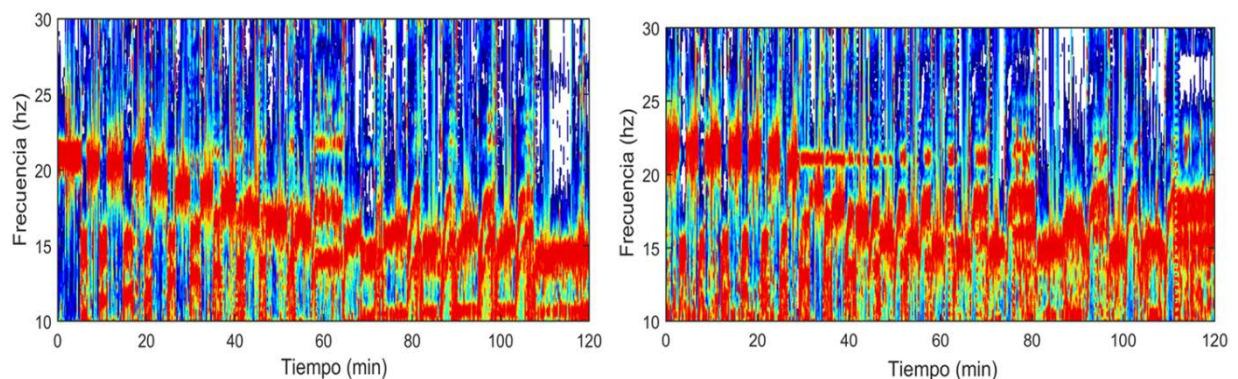
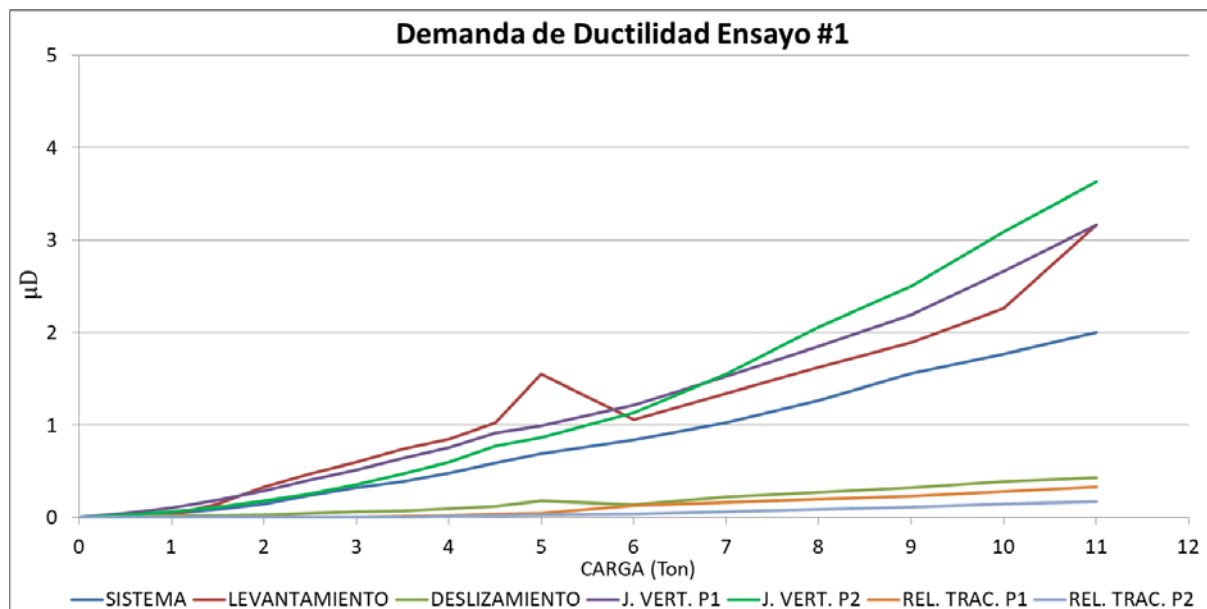


Figura 41: Lectura de Sismógrafos Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha) (Elaboración Propia, 2019).

4.7 Demanda de Ductilidad y Degradación de Rigidez.

La demanda de Ductilidad, es entendida como la capacidad de disipación de energía, y por tanto, nivel de daño alcanzado, en este caso, en conexiones. Como se aprecia en la Figura 42, para ambos casos de estudio, el levantamiento en la cabecera en tracción y la junta vertical del primer y segundo nivel son quienes sobrepasan la demanda de ductilidad correspondiente al valor de la unidad, lo cual quiere decir que incursionan en el rango no lineal, por lo tanto, sufren daños permanentes.

Para que el sistema comience a fluir, algunas componentes del mismo deben fluir, por lo que se cumple la lógica de demandas de ductilidades locales y globales. Por otra parte, se aprecia la linealidad del deslizamiento basal y del deslizamiento relativo en el encuentro perpendicular en tracción. En el caso del Ensayo N°1, quien disipa más energía es la junta vertical del segundo y primer nivel en primera instancia y luego le sigue la tracción de los Hold-Downs. En cambio para el Ensayo N°2, quien alcanza mayores niveles de daño son los Hold-Downs y el Angle Bracket en el encuentro de la cabecera en tracción, seguido de la junta vertical para el segundo y primer nivel.



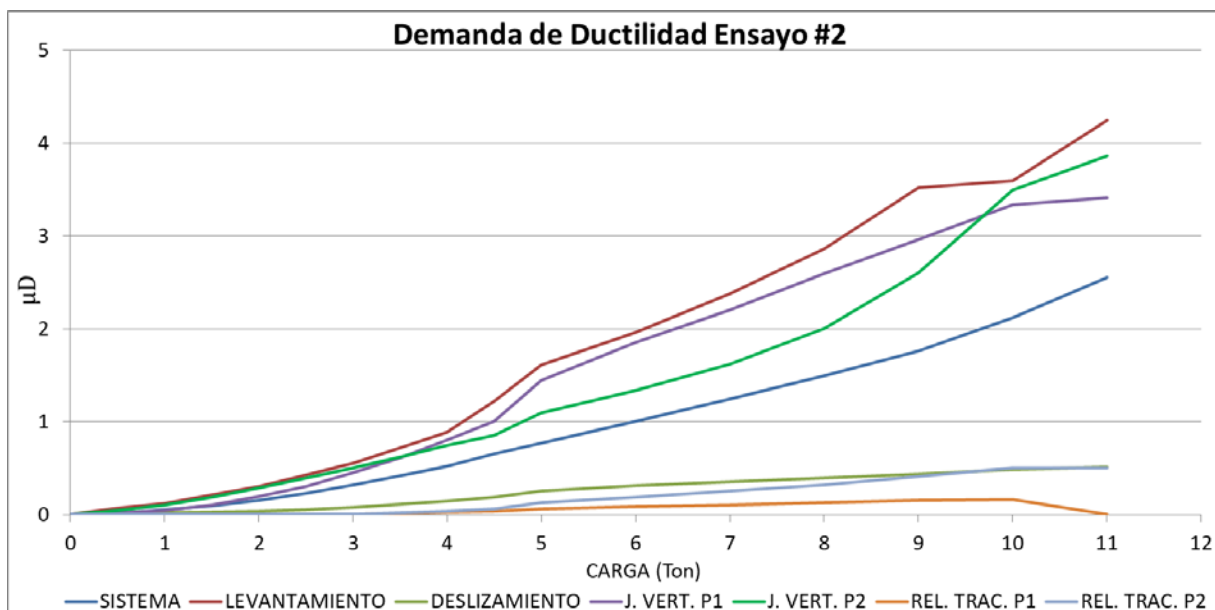


Figura 42: Demanda de Ductilidad Locales y Global Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2(Inferior) (Elaboracion Propia, 2019).

Teniendo en cuenta que la frecuencia es un parámetro lineal de una estructura, se presenta una curva que relaciona, a su vez, la degradación tanto de frecuencia como de rigidez, siendo esta última de vital relevancia en los análisis no lineales, debido a que una pérdida de rigidez global del sistema implica el eventual colapso de la estructura, por lo que se analiza en estado último los niveles alcanzados de las probetas. Esta curva tiene en el eje vertical la relación entre la rigidez secante, la cual es calculada como una rigidez instantánea, y la rigidez elástica del sistema, es decir, la que indica el punto de fluencia, calculadas ambas como muestra la Figura 43. En el eje horizontal se presenta la demanda de ductilidad del sistema, teniendo finalmente esta curva de relaciones en la Figura 44.

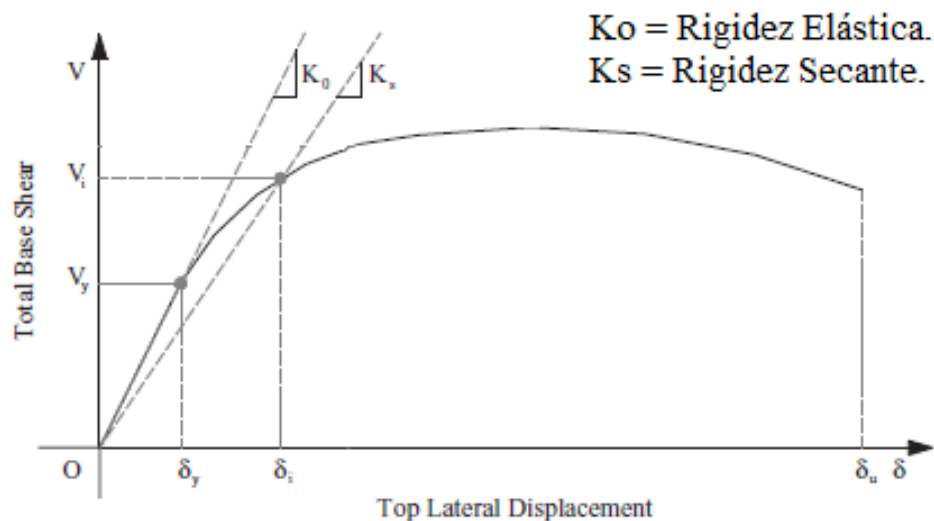


Figura 43: Cálculo de Rigideces desde la Curva del Sistema (Elnashai and Di Sarno, 2008).

Teóricamente, en el rango elástico esta relación debe tener el valor de la unidad, y al traspasarla, incursionar en rangos de degradación y, por tanto, daños en la estructura. En base a la caracterización mecánica de la junta vertical, se pudo obtener los valores de degradación de rigidez de esta misma para la ductilidad local en su estado último, lo cual se verifica debido a los niveles de daño alcanzados, según se mostró en la curva de demanda de ductilidad.

No se cuenta con la caracterización mecánica exacta de los conectores Hold-Down utilizados, por lo tanto, no se puede realizar alguna comparación análoga, sin embargo, se infiere que otro de los importantes aportes en la degradación de la rigidez del sistema, se le atribuye a estos conectores en tracción.

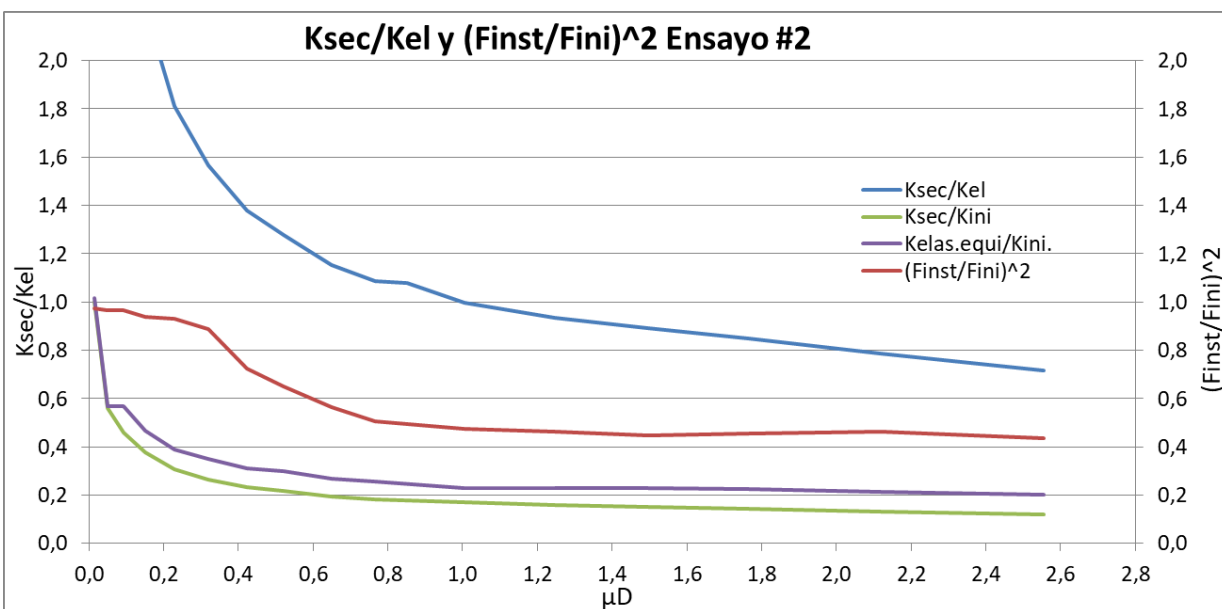
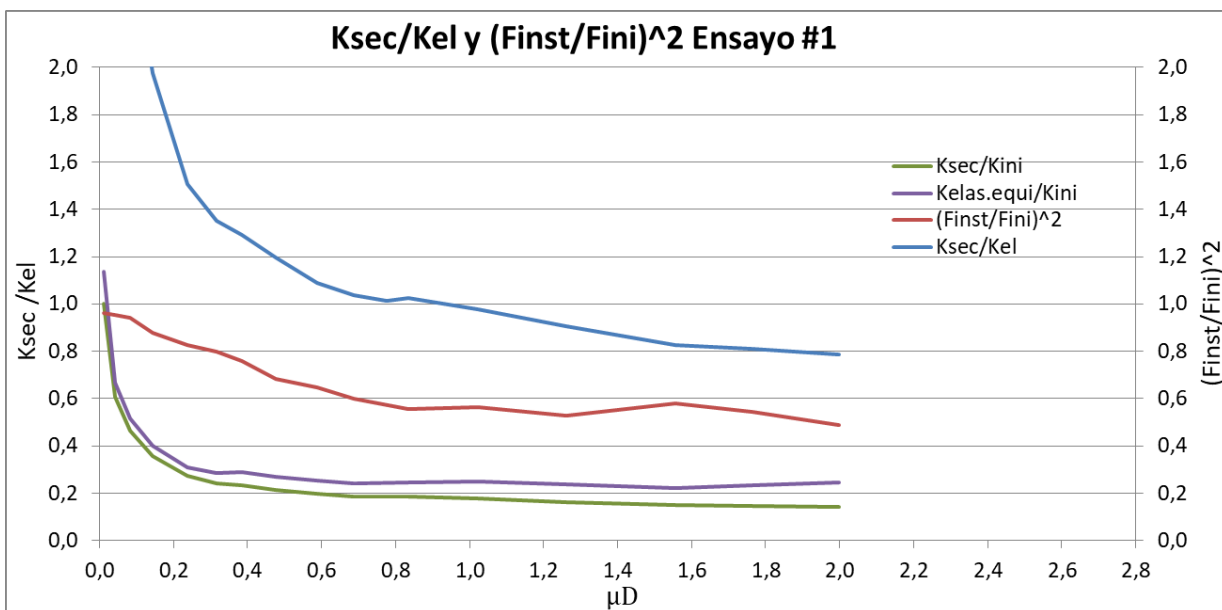


Figura 44: Relación entre la Rigidez y la Frecuencia para Ensayo N°1 (Superior) y Ensayo N°2 (Inferior) (Elaboración Propia, 2019).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A continuación se presentan los aspectos principales a considerar al término del trabajo y además se reconocen las cosas que permitirán seguir la vía de la investigación, con finalidad de fortalecer la caracterización de nuevos sistemas constructivos en madera, aportando con conocimientos para el desarrollo tanto a nivel académico como profesional.

5.1 Conclusiones.

- Se consiguió sintetizar un estado del arte asociado a estudios existentes en estructuras de madera contralaminada, en diversos ámbitos.
- Se logró modelar una estructuración de muro tridimensional de CLT en un software de análisis de elementos finitos, permitiendo realizar el diseño del ensayo mecánico y obtener dos casos de estudio.
- Se identificó la importancia que tiene el roce dentro de lo que es el análisis de estructuras de CLT y en la interpretación de sus curvas características.
- Se reconoció la importancia de lograr una adecuada distribución de las demandas sobre las conexiones de una estructura, a modo de distribuir el daño en el sistema, el cual por si solo es bastante rígido, situando toda su capacidad de disipación de energía en, valga la redundancia, las conexiones.
- Se observaron fenómenos que permiten la simplificación en el proceso de modelación numérica, como por ejemplo, las uniones en encuentros perpendiculares de muros de CLT.

5.2 Recomendaciones.

- Ejecutar ensayos a escala real de diferentes configuraciones estructurales, con la finalidad de apoyar el conocimiento acerca del comportamiento estructural del sistema constructivo, y más aún, de la madera contralaminada.
- Realizar caracterizaciones mecánicas tanto de uniones como de conectores metálicos de estructuras de CLT, con finalidad de conocer los parámetros de input de modelación de manera adecuada y no recurrir a literatura.
- Calibrar el modelo estructural a modo complementario de esta investigación, con la finalidad de anticipar de manera exitosa, la respuesta del sistema, tal y como se logra hoy en día en sistemas constructivos de otros materiales, como por ejemplo, en hormigón armado.

6. REFERENCIAS.

- Asparren K., (2019). Caracterización del comportamiento mecánico de uniones atornilladas en madera contralaminada. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Del Bío-Bío. Concepción.
- Blass, H.J. & Fellmoser P. (2004). Design of solid wood panels with cross layers. In Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, Finland.
- Casagrande et al., (2016). Experimental campaign for the mechanical characterization of connection systems in the seismic design of timber buildings. World conference on timber engineering, Vienna, Austria, August 22-25 2016.
- Ceccotti, A., Lauriola, M. P., Pinna, M., and Sandhaas, C. (2006). SOFIE project—Cyclic tests on cross-laminated wooden panels. Proc., 9th World Conf. on Timber Engineering, Oregon State Univ. Conference Services, Portland, OR.
- Ceccotti, A., Carmen, S., Okabe, M., Yasumura, M., Minowa, C., and Kawai, N. (2013). SOFIE project—3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 42(13), 2003–2021.
- Dujic, B., Hristovski, V., Stojmanovska, M., and Zarnić, R. (2006). Experimental investigation of massive wooden wall panel systems subjected to seismic excitation. Proc., 1st European Conf. on Earthquake Engineering and Seismology, Swiss Society for Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Zurich, Switzerland.
- Elnashai, A.S and Di Sarno, I. (2008) *Fundamentals of Earthquake engineering*. John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom.
- FPInnovations (2011). *CLT Handbook: Cross-laminated Timber*. Edited by Sylvain Gagnon and Ciprian Pirvu. Library and Archives Canada Cataloguing in Publication, Quebec City, Canada.

Gavric, I., Fragiaco M., Ceccotti A. (2014). Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures. Rilem 2014

Gavric, I., Fragiaco M., Ceccotti A. (2015). Cyclic behaviour of typical screwed connectors for cross-laminated (CLT) structures. Berlin Heidelberg 2015a.

Gavric, I., Fragiaco M., Ceccotti A. (2015). Cyclic behaviour of CLT Wall Systems: Experimental Test and Analytical Prediction Models. American Society of Civil Engineers 2015b.

Instituto Nacional de Normalización (INN). NCh 1198-2014: Madera – Construcción en madera – Cálculo. Santiago, Chile.

Instituto Nacional de Normalización (INN). NCh 1207-2017: Pino Radiata, Pino Oregón, Pino Ponderosa – Clasificación visual para uso estructural – Especificaciones de los grados de calidad. Santiago, Chile.

Laguarda Mallo and Espinoza. (2014). Outlook for Cross-Laminated Timber in the United States, Bioresources.

Mestek, P., H. Kreuzinger, and S. Winter (2008). Design of cross laminated timber (CLT). Paper presented at the 10th World Conference on Timber Engineering, June 2-5, 2008, Miyazaki, Japan.

Parra R., (2017). Comportamiento de unión muro-losa en aplicación de madera contralaminada de pino radiata. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Del Bío-Bío. Concepción.

Popovski M., Gavric I. (2015). Performance of a 2-Story CLT House Subjected to Lateral Loads
Rinaldin, G., Amadio C., Fragiaco M. (2013). A component for the hysteretic behaviour of connections in cross-laminated wooden structures.

Pozza, L., Scotta, R., and Vitaliani, R. (2009). A non-linear numerical model for the assessment of the seismic behavior and ductility factor of X-Lam timber structures. Proc., Int. Symp. on Timber Structures, Haliç Univ., Istanbul, Turkey, 151–162.

Sandhaas, C., van de Kuilen, J. W. G., Boukes, J., and Ceccotti, A. (2009). Analysis of X-lam panel-to-panel connections under monotonic and cyclic loading. Proc., 42nd CIB-W18 Meeting, Paper 42-12-2, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany.

Tsuchimoto, T., et al. (2014). Dynamic and static lateral load tests on fullsized 3-story CLT construction for seismic design. Proc., 13th World Conf. on Timber Engineering, FPInnovations, QC, Canada.

Yasumura, M., Kobayashi K., Okabe M., Miyake T., Matsumoto K. (2015) Full-Scale Test and Numerical Analysis of Low-Rise CLT Structures under Lateral Loading. American Society of Civil Engineers 2015.

7. ANEXOS.

ÍNDICE GENERAL

Anexo A	57
Anexo B	59
Anexo C	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura C1: Estado Ultimo Probeta Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha).	60
Figura C2: Aplastamiento en Conector ABR255 al Final del Ensayo N°1.	60
Figura C3: Estado Ultimo ABR255 Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha).	61
Figura C 4: Tornillos Largos sin Daños de Extracción en Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha).	61
Figura C5: Conector Hold-Down HTT4 al Final del Ensayo N°1.	62
Figura C6: Estado Ultimo en Levantamiento del Ensayo N°1.	62
Figura C7: Conector Hold-Down HTT4 al Final del Ensayo N°2.	63
Figura C8: Estado Ultimo en Levantamiento del Ensayo N°2.	63
Figura C9: Tornillo DSVT3R al final del Ensayo N°1 para el Nivel 1 (Izquierda) y Nivel 2 (Derecha).	64
Figura C10: Estado Ultimo en Junta Vertical Ensayo N°1.	64
Figura C11: Tornillo DSVT3R al final del Ensayo N°2 para el Nivel 1 (Izquierda) y Nivel 2 (Derecha).	65
Figura C12: Estado Ultimo en Junta Vertical Ensayo N°2.	65

Anexo A

PROPIEDADES MECÁNICAS DE PANELES DE CLT

Paneles de CLT Tipo Muro, Madera Pino Radiata de Clasificación Visual Grado G1, 3 capas con espesor de 100 mm.

$$E_0 \text{ PIEZA MADERA} = 10000 \text{ MPa}$$

$$E_{90} \text{ PIEZA MADERA} = \frac{E_0 \text{ PIEZA MADERA}}{30} = 333,333 \text{ MPa}$$

$$m = 3$$

$$K_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90} \text{ PIEZA MADERA}}{E_0 \text{ PIEZA MADERA}}\right) * \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$$

$$K_3 = 1 - \left(1 - \frac{333,333}{10000}\right) * \frac{33,33}{100} = 0,6778$$

$$K_4 = \frac{E_{90} \text{ PIEZA MADERA}}{E_0 \text{ PIEZA MADERA}} + \left(1 - \frac{E_{90} \text{ PIEZA MADERA}}{E_0 \text{ PIEZA MADERA}}\right) * \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$$

$$K_4 = \frac{333,333}{10000} + \left(1 - \frac{333,333}{10000}\right) * \frac{33,33}{100} = 0,3556$$

Finalmente, los módulos de elasticidad y cortante de los tableros son:

$$E_0 \text{ TABLERO CLT} = E_0 \text{ PIEZA MADERA} * K_3 = 10000 * 0,6778 = 6777,778 \text{ MPa.}$$

$$E_{90} \text{ TABLERO CLT} = E_0 \text{ PIEZA MADERA} * K_4 = 10000 * 0,3556 = 3555,556 \text{ MPa.}$$

$$G_0 \text{ TABLERO CLT} = \frac{E_0 \text{ PIEZA MADERA}}{16} = \frac{10000}{16} = 625,000 \text{ MPa.}$$

$$G_{90} \text{ TABLERO CLT} = \frac{G_0 \text{ TABLERO CLT}}{10} = \frac{625}{10} = 62,500 \text{ MPa.}$$

Paneles de CLT Tipo Losa, Madera Pino Radiata de Clasificación Visual Grado G1, 3 capas con espesor de 100 mm.

$$E_0 \text{ PIEZA MADERA} = 10000 \text{ MPa}$$

$$E_{90} \text{ PIEZA MADERA} = \frac{E_0 \text{ PIEZA MADERA}}{30} = 333,333 \text{ MPa}$$

$$m = 3$$

$$K_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90} \text{ PIEZA MADERA}}{E_0 \text{ PIEZA MADERA}}\right) * \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$$

$$K_1 = 1 - \left(1 - \frac{333,333}{10000}\right) * \frac{33,33^3}{100^3} = 0,8926$$

$$K_4 = \frac{E_{90} \text{ PIEZA MADERA}}{E_0 \text{ PIEZA MADERA}} + \left(1 - \frac{E_{90} \text{ PIEZA MADERA}}{E_0 \text{ PIEZA MADERA}}\right) * \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$$

$$K_4 = \frac{333,333}{10000} + \left(1 - \frac{333,333}{10000}\right) * \frac{33,33^3}{100^3} = 0,1407$$

Finalmente, los módulos de elasticidad y cortante de los tableros son:

$$E_0 \text{ TABLERO CLT} = E_0 \text{ PIEZA MADERA} * K_1 = 10000 * 0,8926 = 8925,926 \text{ MPa.}$$

$$E_{90} \text{ TABLERO CLT} = E_0 \text{ PIEZA MADERA} * K_2 = 10000 * 0,1407 = 1407,407 \text{ MPa.}$$

$$G_0 \text{ TABLERO CLT} = \frac{E_0 \text{ PIEZA MADERA}}{16} = \frac{10000}{16} = 625,000 \text{ MPa.}$$

$$G_{90} \text{ TABLERO CLT} = \frac{G_0 \text{ TABLERO CLT}}{10} = \frac{625}{10} = 62,500 \text{ MPa.}$$

Anexo B

TABLA DE DATOS DE CONECTORES Y/O UNIONES

Conector	Ensayo	Kel (kN/mm)	Kpl₁ (kN/mm)	Kpl₂ (kN/mm)	Fy (kN)	Vy (mm)	Fmax (kN)	Vmax (mm)	Fu (kN)	Vu (kN)
AB TTN240	Tracción	5,31	0,83	-0,38	10,40	1,96	16,32	9,12	13,67	16,05
	Corte	3,72	0,31	-0,44	21,03	5,66	24,42	16,73	19,54	27,80
HD WHT340	Tracción	5,71	1,51	-1,96	50,89	8,92	60,19	15,06	48,15	21,20
AB AE116	Tracción	2,65	0,41	-0,86	19,22	7,26	23,47	17,69	18,74	23,19
	Corte	1,96	0,23	-1,60	22,98	11,74	26,85	28,51	21,48	31,86
HBS ϕ 10x180	Ext. Lateral 1	1,53	0,12	-0,17	5,25	3,44	7,54	23,10	6,03	31,94
	Ext. Lateral 2	1,25	0,11	-0,35	5,29	4,22	7,92	27,31	6,34	31,82
	Ext. Directa	2,66	0,12	-0,07	4,66	1,75	7,83	28,04	6,27	49,50
HBS ϕ 10x260	Ext. Lateral 1	1,40	0,12	-0,31	5,04	3,59	7,87	27,14	6,30	32,25
	Ext. Lateral 2	0,98	0,12	-0,09	5,84	5,95	8,53	28,57	6,82	48,27
	Ext. Directa	3,91	0,17	-0,15	5,08	1,30	8,10	18,56	6,52	28,92
HBS ϕ 8x80	Ext. Lateral Paralela	0,85	0,09	-0,45	4,85	5,70	7,33	34,37	5,86	37,66
	Ext. Lateral Perpendicular	1,03	0,09	-0,12	3,23	3,14	6,40	39,40	5,12	50,52
DSVT3R	Ext. Lateral Paralela	0,63	0,09	-0,12	2,46	3,88	4,43	26,64	3,54	33,99

Anexo C

RESULTADOS Y ANÁLISIS

1. Curva de Capacidad



Figura C1: Estado Ultimo Probeta Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha).

2. Deslizamiento Basal

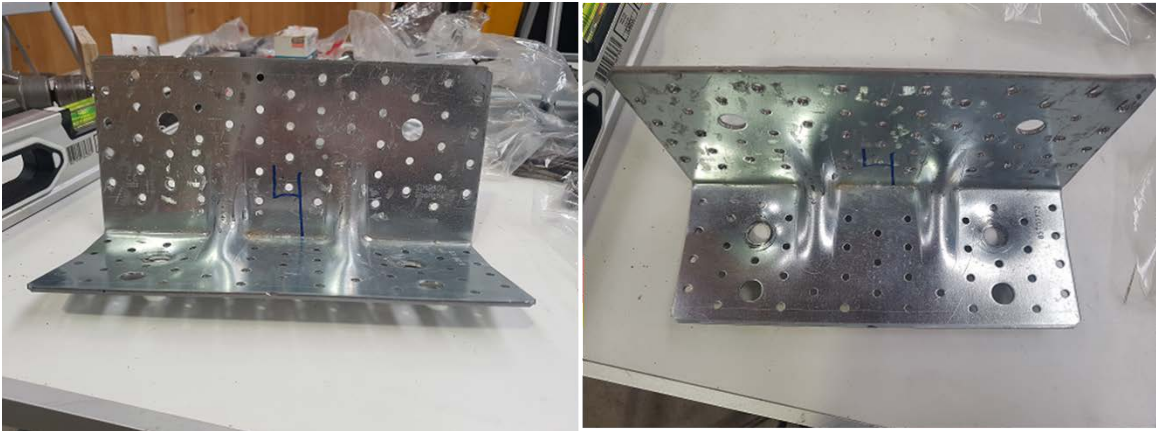


Figura C2: Aplastamiento en Conector ABR255 al Final del Ensayo N°1.



Figura C3: Estado Ultimo ABR255 Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha).

3. Deslizamiento Relativo en Encuentro Perpendicular en Tracción.



Figura C 4: Tornillos Largos sin Daños de Extracción en Ensayo N°1 (Izquierda) y Ensayo N°2 (Derecha).

4. Levantamiento de Cabecera en Tracción.

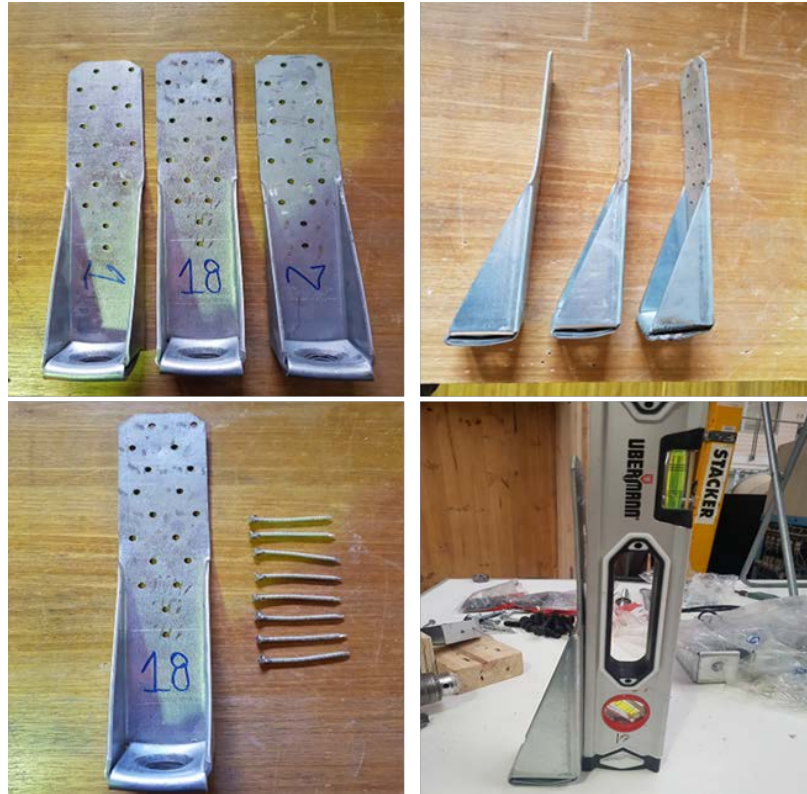


Figura C5: Conector Hold-Down HTT4 al Final del Ensayo N°1.



Figura C6: Estado Ultimo en Levantamiento del Ensayo N°1.

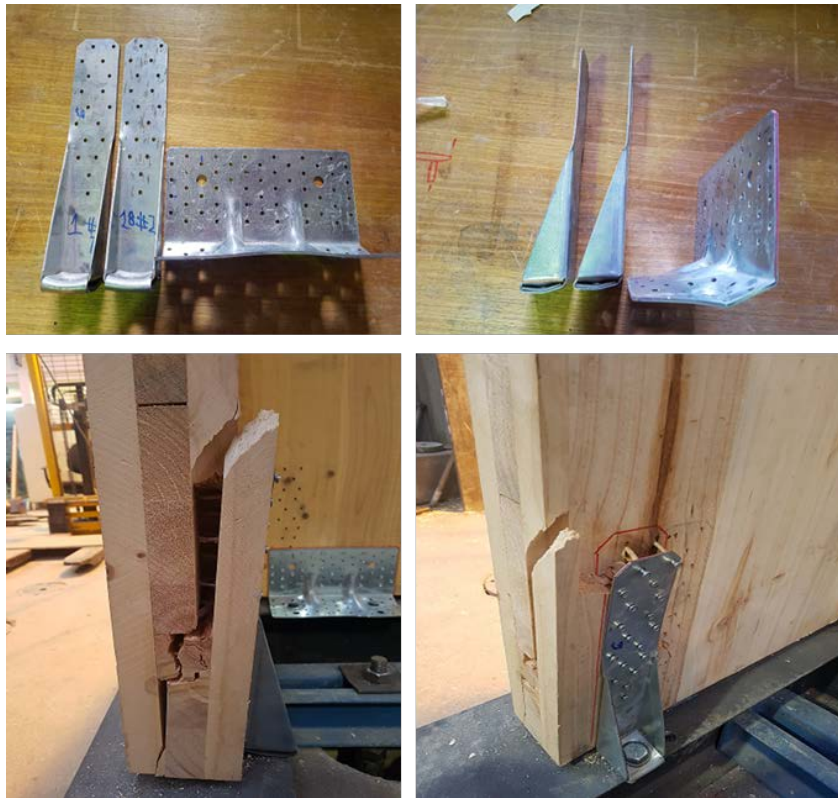


Figura C7: Conector Hold-Down HTT4 al Final del Ensayo N°2.



Figura C8: Estado Ultimo en Levantamiento del Ensayo N°2.

5. Desplazamiento Relativo en Junta Vertical.



Figura C9: Tornillo DSVT3R al final del Ensayo N°1 para el Nivel 1 (Izquierda) y Nivel 2 (Derecha).



Figura C10: Estado Ultimo en Junta Vertical Ensayo N°1.



Figura C11: Tornillo DSVT3R al final del Ensayo N°2 para el Nivel 1 (Izquierda) y Nivel 2 (Derecha).



Figura C12: Estado Ultimo en Junta Vertical Ensayo N°2.