

# UNIVERSIDAD DEL BÍO- BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**Profesor Patrocinante:** Ms. Juan Marcus Schwenk

## “COMPORTAMIENTO DE UNIÓN MURO-LOSA EN APLICACIÓN DE MADERA CONTRA LAMINADA DE PINO RADIATA”

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

**RICARDO IGNACIO PARRA ZUÑIGA**

**CONCEPCION, ABRIL DEL 2017.**

**INDICE.**

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>viii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>ix</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>x</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>2</b>
<b>1 INTRODUCCION.....</b>	<b>3</b>
1.1 IDENTIFICACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA. ....	4
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN. ....	5
1.3.1 <i>Objetivo General.</i> ....	5
1.3.2 <i>Objetivos Específicos.</i> .....	5
1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO. ....	6
<b>2 ANTECEDENTES PRELIMINARES. ....</b>	<b>7</b>
2.1 RESISTENCIA SÍSMICA DE LOS EDIFICIOS DE MADERA. ....	7
2.1.1 <i>Rigidez.</i> ....	8
2.1.2 <i>Resistencia o capacidad estructural.</i> .....	9
2.1.3 <i>Ductilidad.</i> ....	9
2.2 TIPOLOGÍAS DE SISTEMA DE CONEXIÓN UTILIZADOS EN LA UNIÓN MURO-LOSA DE PANELES CLT. ....	11
2.2.1 <i>Tornillos auto perforantes.</i> .....	12
2.2.2 <i>Soportes metálicos.</i> .....	12
2.2.3 <i>Placas metálicas ocultas.</i> ....	12
2.3 MÉTODOS DE DISEÑO DE CONEXIONES EN MADERA. ....	13

2.3.1	<i>Norma Chilena “Madera – Construcciones en madera – Cálculo” (NCh 1198:2014).</i>	14
2.3.2	<i>Euro código 5 “Diseño de madera estructural” (EC5)</i>	17
2.3.3	<i>Uibel y Blaß.</i>	19
<b>3</b>	<b>MATERIALES Y METODOS.</b>	<b>20</b>
3.1	MATERIALES.	20
3.1.1	<i>CLT de pino radiata.</i>	20
3.1.2	<i>Adhesivo SikaForce-7710 L100.</i>	21
3.1.3	<i>Clavo Anker.</i>	21
3.1.4	<i>Herraje Angle Bracket.</i>	22
3.2	CONFIGURACIÓN DE ENSAYOS.	23
3.2.1	<i>Ensayos bajo cargas monotónicas.</i>	24
3.2.2	<i>Ensayos bajo cargas cíclicas.</i>	25
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.</b>	<b>27</b>
4.1	ETAPA EXPERIMENTAL.	27
4.1.1	<i>Resultados de las pruebas monotónicas.</i>	27
4.1.2	<i>Resultados de los ensayos cíclicos.</i>	30
4.2	PREDICCIÓN DE MODELOS ANALÍTICOS PREVIAMENTE ESTUDIADOS.	34
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b>	<b>40</b>
	<b>ANEXO A.</b>	<b>41</b>
	<b>ANEXO B.</b>	<b>45</b>
	<b>ANEXO C.</b>	<b>48</b>

<b>ANEXO D.....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO E.....</b>	<b>60</b>

## INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Edificios residenciales con paneles CLT: (a) 10 pisos Fonté, Australia; (b) 18 pisos Brock Commons, Canadá; (c) 9 pisos Stadthaus, Inglaterra.....	3
Figura 2. Metodología de trabajo.....	6
Figura 3. Comportamiento de histéresis de una conexión dúctil en madera capaz de disipar energía (Dujic B. et al, 2006).....	8
Figura 4. (a) Curva típica de respuesta estructural para sistemas sujetos a cargas horizontales; (b) Definición de resistencia o capacidad estructural; (c) definición de ductilidad estructural (Elnashai & Di Sarno, 2008).....	10
Figura 5. Lugares de conexión en un edificio de CLT. Punto C, conexión muro-losa.....	11
Figura 6. Conexión típica para paneles CLT muro-losa: (a) conexión con tornillos auto perforantes; (b) conexión con soportes metálicos; (c) conexión con placas metálicas ocultas. (FPInnovations, 2013).....	13
Figura 7. Acciones de tipo horizontal y distribución de las solicitaciones, en un edificio de madera.....	14
Figura 8. Modos de fluencia en uniones de madera con elementos de fijación mecánicos (NCh 1198:2014).....	16
Figura 9. Modos de fallas para conexiones acero-madera, según EC5.....	17
Figura 10. Panel CLT.....	20
Figura 11. Geometría y características mecánicas, clavo Anker LBA 4x60 mm., según catalogo Rothoblaas (2015).....	21
Figura 12. Valores característicos y admisibles, clavo Anker LBA 4x60 mm., según catalogo Rothoblaas (2015).....	21
Figura 13. Dimensiones y Geometría de conector angle bracket TTN240, según catalogo Rothoblaas (2015).....	22
Figura 14. Valores característicos y admisibles para el angle bracket TTN240, según catalogo Rothoblaas (2015).....	22

Figura 15. Procedimiento de carga para ensayos monotónicos de uniones con conectores mecánicos, según EN 26891,1991.....	24
Figura 16. Protocolo de carga para ensayos cíclicos de uniones con conectores mecánicos, según EN 12512,2001.....	25
Figura 17. Configuración de prueba para conexión muro-losa del angle bracket cargado en tensión.....	26
Figura 18. Configuración de prueba para conexión muro-losa del angle bracket cargado en corte.....	26
Figura 19. Curvas monotónicas típicas para angle bracket cargados en tracción y corte.....	29
Figura 20. Modo de falla en unión muro-losa conectado con angle bracket cargado en tracción.....	30
Figura 21. Curvas típicas de histéresis del angle bracket cargado en tracción.....	31
Figura 22. Modo de falla en unión muro-losa conectado con angle bracket cargado en corte.....	31
Figura 23. Curvas típicas de histéresis del angle bracket cargado en corte.....	32
Figura 24. Comparación entre los resultados de los ensayos experimentales y los valores característicos calculados de capacidad.....	35
Figura 25. Formación de rotulas plásticas en los clavos y aplastamiento en la madera del panel CLT.....	36

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Ecuaciones para los modelos de fluencia de los medios de unión solicitados en extracción lateral (NCh 1198:2014).....	15
Tabla 2. Matriz de ensayos para conectores tipo Angle Brackets.....	23
Tabla 3. Propiedades mecánicas estáticas de los conectores Angle Bracket, según EN 12512:2001.....	28
Tabla 4. Propiedades mecánicas cíclicas de los conectores Angle Bracket, según EN 12512:2001.....	33
Tabla 5. Resistencia característica analítica del angle bracket y modo de falla previsto.....	35

## **DEDICATORIA**

A mis padres y familia en general,  
por su apoyo incondicional  
y por permitir siempre alcanzar mis sueños.



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradecer a Dios por permitirme llegar hasta donde he llegado, por hacer realidad un sueño anhelado. Por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y por sobre todo felicidad.

Agradecer a mis padres, Ricardo y Clara, por los valores inculcados, por su apoyo incondicional y por haberme entregado las oportunidades y las herramientas para tener una excelente educación.

También agradecer a mi profesor guía, Profe Juan Marcus, por haberme brindado la oportunidad de desarrollar mi proyecto de título, por la confianza, paciencia y dedicación de su tiempo. Además, agradecer a JMS Ingenieros consultores Ltda., por las facilidades y gestiones de diferentes recursos.

A don Víctor Rosales, por su visión crítica y rectitud como profesional, por su paciencia y experiencia, por sus consejos que ayudan a crecer día a día como persona y profesional.

A mi compañero y amigo Álvaro Luna, por el trabajo en equipo. También agradecer a todo el equipo profesional y humano que hizo posible la realización de este trabajo.

**NOMENCLATURA.**

<b>F:</b>	carga aplicada, <b>N</b> .
<b>F<sub>est</sub>:</b>	carga máxima estimada, <b>N</b> .
<b>F<sub>máx</sub>:</b>	carga máxima, <b>N</b> .
<b>F<sub>u</sub>:</b>	carga última, <b>N</b> .
<b>F<sub>y</sub>:</b>	carga plástica, <b>N</b> .
<b>v:</b>	deslizamiento de la unión, <b>mm</b> .
<b>v<sub>u</sub>:</b>	deslizamiento último, <b>mm</b> .
<b>v<sub>y</sub>:</b>	deslizamiento plástico, <b>mm</b> .
<b>K:</b>	módulo de deslizamiento, <b>N/mm</b> .
<b>ΔF:</b>	perdida de resistencia, <b>N</b>
<b>D:</b>	ductilidad.
<b>P<sub>el</sub>:</b>	capacidad de carga admisible, <b>N</b> .
<b>L<sub>c</sub>:</b>	longitud de apoyo del medio de unión en la pieza ppal., <b>mm</b> .
<b>L<sub>l</sub>:</b>	longitud de apoyo del medio de unión en la pieza secundaria, <b>mm</b> .
<b>R<sub>ap,c</sub>:</b>	resistencia de aplastamiento del vástago en la pieza ppal., <b>MPa</b> .
<b>R<sub>ap,l</sub>:</b>	resistencia de aplastamiento del vástago en la pieza secundaria, <b>MPa</b> .
<b>F<sub>ff</sub>:</b>	tensión de fluencia en flexión del acero, <b>MPa</b> .
<b>D:</b>	diámetro del vástago, <b>mm</b> .
<b>ρ<sub>0</sub>:</b>	densidad anhidra media, <b>kg/m<sup>3</sup></b> .
<b>P<sub>ed,ad</sub>:</b>	carga admisible de extracción directa, <b>kN</b> .
<b>ρ<sub>0,k</sub>:</b>	densidad anhidra característica, <b>g/cm<sup>3</sup></b> .
<b>p:</b>	penetración del clavo, <b>mm</b> .
<b>F<sub>v,Rk</sub>:</b>	es la capacidad característica de carga, <b>N</b> .
<b>f<sub>h,k</sub>:</b>	es la resistencia característica de aplastamiento o incrustación en la madera, <b>N/mm<sup>2</sup></b> .
<b>t<sub>1</sub>:</b>	es la profundidad de penetración, <b>mm</b> .
<b>d:</b>	es el diámetro de conector, <b>mm</b> .
<b>M<sub>y,Rk</sub>:</b>	es el momento plástico característico, <b>N-mm</b> .
<b>F<sub>ax,Rk</sub>:</b>	es la capacidad característica a extracción del conector, <b>N</b> .

## **Comportamiento de unión muro-losa en aplicación de madera contra laminada de pino radiata.**

**Autor: Ricardo Ignacio Parra Zuñiga.**

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

Correo electrónico: [riparra@alumnos.ubiobio.cl](mailto:riparra@alumnos.ubiobio.cl)

**Profesor Patrocinante:** Juan Marcus Schwenk.

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

Correo electrónico: [jmarcus@jms.com](mailto:jmarcus@jms.com)

### **Resumen:**

Se llevaron a cabo pruebas experimentales en conectores angle bracket típicos en CLT para conectar los paneles muro a paneles losa. Se analizan los resultados de las pruebas monotónicas y cíclicas en corte y tracción llevadas a cabo sobre el angle bracket modelo Titan TTN240 de la firma italiana Rothoblaas. Todas las propiedades mecánicas importantes en el diseño de la conexión tales como resistencia, rigidez, ductilidad se calcularon de acuerdo al procedimiento de la norma EN12512 (2001) y los resultados son presentados y discutidos de forma crítica en este trabajo. Bajo cargas de tracción, en la conexión objeto de estudio se observó un modo de falla frágil, mientras que bajo cargas de corte se observa un modo de falla más deseable con la formación de rotulas plásticas en el elemento de fijación y aplastamiento en la madera.

Además, se proporciona una comparación entre los resultados de las pruebas experimentales y las distintas fórmulas analíticas entregadas en los códigos de diseño tales como, la NCh 1198, el EC5 y las formulas propuestas por Uibel & Blaß. Códigos de diseño y fórmulas que nos conducen a resultados muy conservadores.

Por último, se entregan algunas sugerencias para mejorar el comportamiento de la conexión objeto de estudio.

**Palabras claves:** madera contra laminada (CLT), comportamiento, unión, muro-losa, angle bracket.

**8.234 Palabras Texto + 25 Figuras\*250 + 4 Tablas\*250 = 15.484 Palabras Totales.**

## **Behaviour of wall-floor connection in application of cross-laminated timber from radiata pine.**

**Author:** Ricardo Ignacio Parra Zuñiga.

Department of Civil y Environmental Engineering, University of the Bío-Bío.

E-mail: [riparra@alumnos.ubiobio.cl](mailto:riparra@alumnos.ubiobio.cl)

**Professor Sponsor:** Juan Marcus Schwenk.

Department of Civil y Environmental Engineering, University of the Bío-Bío.

E-mail: [jmarcus@jms.com](mailto:jmarcus@jms.com)

### **Abstract:**

Experimental tests were performed on typical angle bracket connectors at CLT to connect the wall panels to the floor panels. The results of the monotonic and cyclic test in shear and tension carried out on the Titan angle bracket model TTN240 of the Italian firm Rothoblaas were analyzed. All mechanical properties important in the design of the connection such as strength, stiffness, ductility was calculated according to the procedure of standard EN 12512 (2001) and the results are presented and critically discussed in this work. Under tension loads, on the connection object of study brittle failure mode was observed, while under shear loads more desirable mode of failure is observed with the formation of plastic hinges in the fastener and crushing on wood.

In addition, a comparison is made between the results of the experimental tests and the different analytical formulas given in the design codes such as NCh 1198, EC 5 and the formulas proposed by Uibel & Blaß. Design codes and formulas that lead us to very conservative results.

Finally, some suggestions are given to improve the behaviour of the connection object of study.

**Keywords:** cross-laminated timber (CLT), behaviour, connection, wall-floor, angle bracket.

## 1 INTRODUCCION.

Los paneles de madera contra laminada, conocidos por sus siglas en inglés como CLT (Cross Laminated Timber), es un sistema constructivo de edificación relativamente nuevo. Se desarrolló por primera vez en la década del 90 en Austria y Alemania, ganando popularidad en los últimos años gracias a programas pilotos que impulsan la construcción verde o sustentable. El CLT es percibido como un material sólido y de gran capacidad a la par con la percepción de materiales como el hormigón armado o la albañilería. La experiencia europea indica que el CLT es un tipo de construcción competitiva, sobre todo en estructuras de mediana y gran envergadura (Gagnon y Pirvu, 2011).

En la actualidad ha sido empleado exitosamente para la construcción de edificios en altura; comúnmente es utilizado de losa y muro estructural en la edificación. Las obras más importantes con este material hasta el día de hoy son el edificio de departamentos de 10 pisos Fonté en Australia, 18 pisos Brock Commons en Canadá, 9 pisos Stadthaus en Inglaterra (véase figura 1).

Distintos programas de investigación se han llevado a cabo en Europa, Norte América y Chile con el objetivo de comprender mejor la tecnología CLT. Uno de ellos fue el proyecto SOFIE desarrollado por IVALSA y el instituto de la madera en Italia, en donde edificios de 1, 3 y 7 pisos fueron probados sobre una mesa vibratoria. Este proyecto fue un punto de referencia para el desarrollo de programas experimentales sobre conectores típicos para CLT.



(a)

(b)

(c)

**Figura 1. Edificios residenciales con paneles CLT: (a) 10 pisos Fonté, Australia; (b) 18 pisos Brock Commons, Canadá; (c) 9 pisos Stadthaus, Inglaterra.**

## **1.1 Identificación y justificación del problema.**

La utilización de CLT en la construcción comienza lentamente a despertar interés en el mundo inmobiliario, sobre todo en la construcción de edificaciones con productos sustentables. Para que esto llegue a ser posible en países de alta sismicidad como Chile, se debe contar con la información relativa a la ductilidad, rigidez, disipación de energía y pérdida de resistencia de las uniones con conectores metálicos empleados en este sistema de construcción, ya que la mayor parte de la flexibilidad de la construcción se concentra en las conexiones.

Por lo tanto, para un análisis sísmico fiable, es crucial investigar el comportamiento cíclico de las conexiones entre los elementos de CLT y con la fundación. Se requieren los resultados de las pruebas experimentales para alimentar modelos numéricos avanzados, para el desarrollo de métodos de diseño, y para la derivación de los modelos de cálculo de análisis de parámetros de entrada como la resistencia y la rigidez de las conexiones, parámetros fundamentales a la hora de realizar análisis sísmicos a estructuras de CLT.

Esta investigación apunta a comprender mejor el potencial de la tecnología CLT como un sistema sísmo resistente, evaluando propiedades mecánicas experimentales de los conectores metálicos típicamente utilizados para CLT. Más investigaciones siguen siendo necesarias para caracterizar por completo el comportamiento de las diferentes tipologías de conectores para paneles CLT, con el objetivo de proporcionar información necesaria a los profesionales involucrados en la práctica del diseño e introducir al país un nuevo sistema constructivo.

## **1.2 Objetivos de la investigación.**

### *1.3.1 Objetivo General.*

- Evaluar experimentalmente el desempeño estructural de una conexión típica muro-losa utilizada para paneles CLT de pino radiata.

### *1.3.2 Objetivos Específicos*

- Recopilar información respecto a las tipologías de uniones muro-losa, típicas para paneles CLT.
- Realizar ensayos bajo cargas estáticas y cíclicas que permitan evaluar el desempeño de una conexión muro-losa en paneles CLT.
- Evaluar las propiedades mecánicas de la conexión y analizarlas bajo cargas estáticas y cíclicas.
- Comparar los resultados experimentales con códigos de diseño existentes.

### 1.3 Metodología de trabajo.

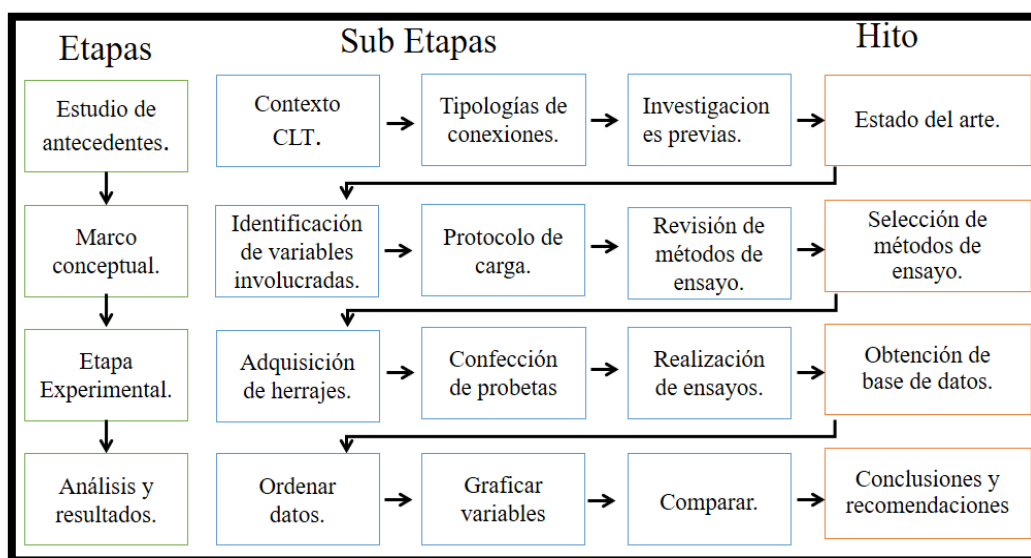
La metodología de trabajo se ordena a través de etapas:

La primera etapa consiste en el estudio de los antecedentes ya sean en el contexto nacional como internacional de los paneles CLT y sus conexiones. Una revisión bibliográfica del comportamiento de distintas tipologías de conexión y las investigaciones que se han realizado respecto al tema.

En la segunda etapa se identifican las variables involucradas para caracterizar el comportamiento de una conexión, se revisarán métodos de ensayos y protocolo de carga. De esta forma seleccionar una batería de ensayos compatible con el equipamiento en la universidad.

La tercera etapa será la fase experimental en donde se adquieren los herrajes, confeccionan las probetas de CLT y se implementan los ensayos. Para finalmente obtener y procesar los datos.

Por último, la cuarta etapa y final de análisis y resultados en donde finalizados los ensayos experimentales consiste en la interpretación de los datos obtenidos, ordenando, graficando, calculando y comparando las distintas variables involucradas, para finalmente terminar con las conclusiones y recomendaciones.



**Figura 2. Metodología de trabajo.**



## 2 ANTECEDENTES PRELIMINARES.

### 2.1 Resistencia sísmica de los edificios de madera.

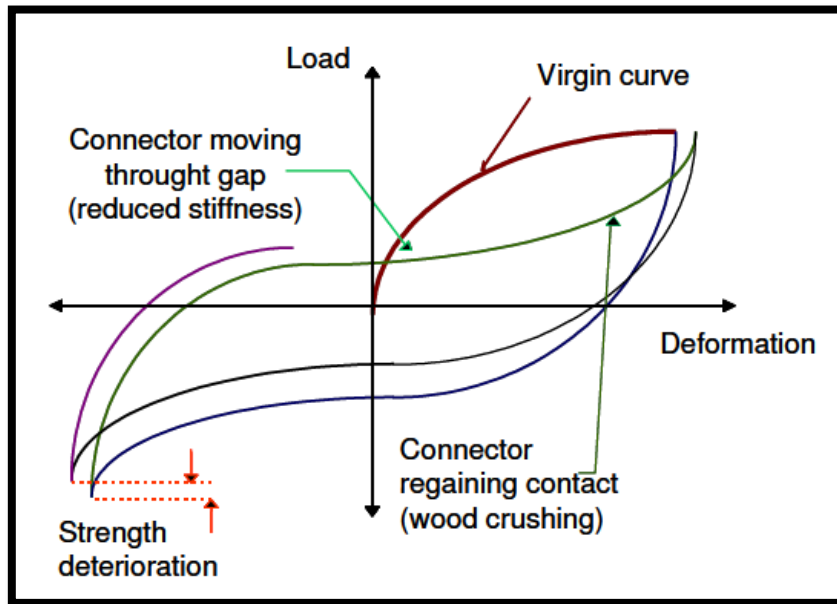
La resistencia sísmica de las construcciones en madera está gobernada principalmente por 3 parámetros: rigidez, resistencia y ductilidad de los componentes estructurales y no estructurales, así como en el nivel de todo el edificio. Al evaluar el comportamiento de las estructuras de madera se debe tener en cuenta que la madera es un material anisotrópico donde las propiedades de resistencia y rigidez varían con la orientación de las fibras de la madera (Dujic B., Aicher S., Zarnic R., 2006).

Construcciones sísmicamente bien diseñadas abarcan los beneficios de todos los parámetros anteriormente citados. *En el caso de los edificios de madera, especialmente el diseño apropiado de uniones y anclajes contribuyen a una estructura con alto potencial de disipación de energía y por lo tanto mayor resistencia a la acción sísmica.*

Las estructuras de madera típicamente poseen un periodo fundamental de 0.2 a 0.8 seg. Y los valores típicos de amortiguamiento para estructuras macizas de madera se encuentran en un rango de 3% a 5%, mientras que en el caso de las estructuras de entramado ligero los valores de amortiguamiento se encuentran en rangos de 3% a 20% (Dujic B., Aicher S., Zarnic R., 2006). Las partes más importantes en relación con la respuesta sísmica de las estructuras de madera son las conexiones y las anclas de los paneles. Para la conexión de los paneles de madera se deben utilizar pernos delgados, tornillos o clavos para permitir el comportamiento dúctil de todo el edificio.

El comportamiento histerético de las conexiones y anclajes se rige por las propiedades de la madera y sus conectores. Las líneas de histéresis son usualmente suaves sin un límite de fluencia bien definido. Los bucles son de medianamente a severamente ajustados (ver Figura 3). El efecto de ajuste es causado por la pérdida de rigidez en pequeñas deformaciones.

El comportamiento de un edificio durante un terremoto se puede predecir mediante modelos matemáticos que suelen depender de varios parámetros, que sólo pueden definirse mediante investigaciones experimentales de los elementos constitutivos del edificio de madera. Los experimentos comprenden ensayos cíclicos de conexiones, seguidos de pruebas cíclicas de paneles anclados y finalmente de ensayos de agitación de conjuntos estructurales y / o prototipos de edificios enteros (Hristovski y Stojmanovska, 2005).



**Figura 3. Comportamiento de histéresis de una conexión dúctil en madera capaz de disipar energía (Dujic B. et al, 2006).**

### 2.1.1 Rigidez.

Se define como la capacidad de un elemento o un conjunto de elementos estructurales de resistir desplazamientos cuando está sujeto a acciones como se muestra en la Figura 4. Este parámetro se expresa como una relación entre la fuerza y el desplazamiento. Gráficamente la rigidez es la pendiente tangente a un punto cualquiera de la curva.

La rigidez puede ser definida, dependiendo de la naturaleza de las cargas aplicadas. Los sismos y el viento generan fuerzas de inercia debido a la vibración de masas, por consiguiente, rigidez lateral u horizontal es requerida prioritariamente para estructuras sísmicas. Dentro de un sistema estructural la rigidez busca satisfacer la funcionalidad de la estructura bajo cargas dinámicas. Durante un sismo, la rigidez de la estructura de madera es decreciente debido al reblandecimiento de las uniones y conexiones incrementándose los periodos fundamentales (Dujic B., Aicher S., Zarnic R., 2006). Además, la alta rigidez de los elementos estructurales proporciona una limitación de las deflexiones laterales, pero viceversa, atrae el aumento de las fuerzas proporcionales a la rigidez (Dujic B., Aicher S., Zarnic R., 2006).

### 2.1.2 Resistencia o capacidad estructural.

Resistencia de un elemento o un sistema estructural es la capacidad de resistir cargas, es usualmente definida en función del tipo de acción. Las resistencias a axial, momento y cortante son empleadas para cuantificar la capacidad de una estructura y sus elementos en ingeniería sísmica. En la curva de capacidad que se muestra en la Figura 4, la capacidad a cortante  $V$  de la estructura es definida por:  $V_y$  que es el corte resistente que define el límite elástico y  $V_{max}$  que es la máxima resistencia al corte. De similar manera se grafican la resistencia axial y a momento. La primera en función al desplazamiento y la segunda en términos de rotación.

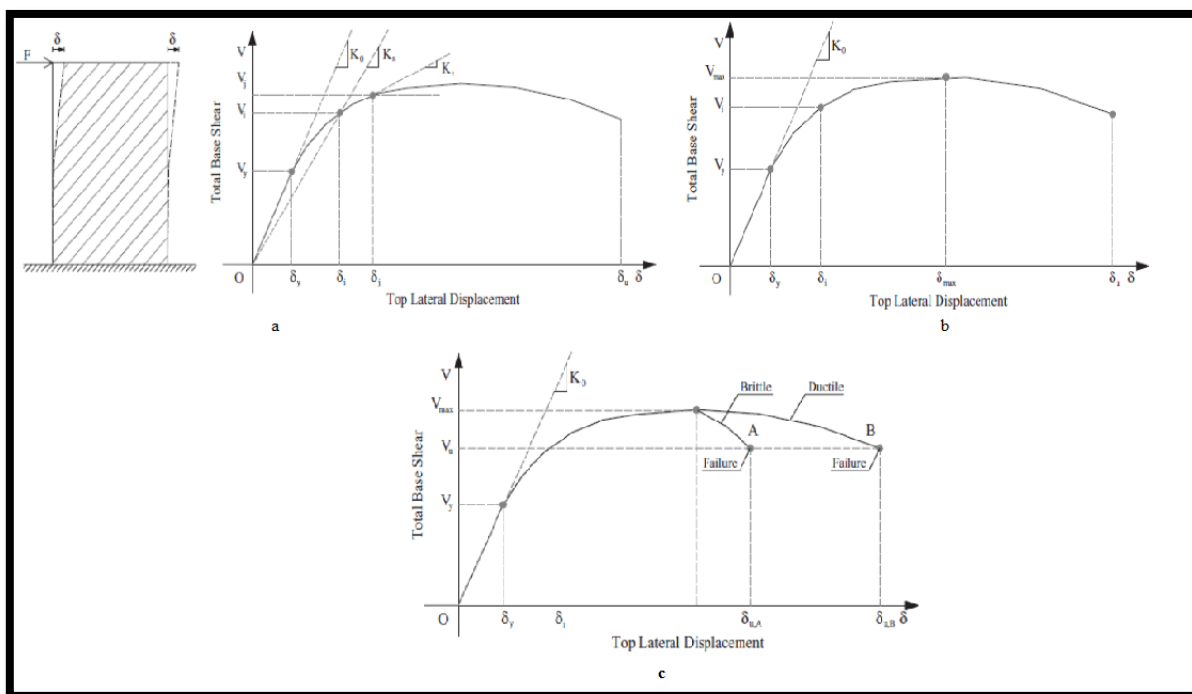
Los terremotos producen fuerzas laterales proporcionales al peso de la estructura; la resultante de estas fuerzas sísmicas se conoce como corte basal. Se requiere una adecuada capacidad al corte, axial y a flexión para hacer frente a las fuerzas sísmicas de cada piso y a la fuerza total. La combinación de las cargas verticales y horizontales durante un evento sísmico incrementa el nivel de tensión en los elementos y uniones. La resistencia del elemento hace que el edificio sea resistente a las fuerzas sísmicas e impide el desarrollo de daños hasta un cierto límite (Dujic B., Aicher S., Zarnic R., 2006).

La resistencia total de una estructura no es la suma de cada una de las resistencias de sus elementos. Las cargas cíclicas causan pérdida de resistencia en los elementos y uniones, principalmente disminuyen la capacidad a axial y constante. En zonas sísmicas, es deseable que la resistencia a cortante sea más alta, un objetivo que se logra aplicando el diseño por capacidad.

### 2.1.3 Ductilidad.

La ductilidad es la habilidad de un elemento o sistema estructural de deformarse más allá del límite elástico con aceptable reducción de la rigidez y resistencia. En la Figura 4, se muestra la relación corte-desplazamiento y se establece una comparación entre la respuesta estructural de una estructura dúctil y frágil. La ductilidad está relacionada directamente a la energía de disipación; alta ductilidad es necesaria para disipar grandes cantidades de energía sísmica. Además, la capacidad de los elementos estructurales y de los edificios enteros para disipar la energía impuesta por el terremoto disminuye la acción destructiva de este mismo.

La ductilidad permite una reducción de las fuerzas sísmicas, pero la interacción de los elementos estructurales y no estructurales de ductilidad diferente tiene que ser cuidadosamente estudiada (Dujic B., Aicher S., Zarnic R., 2006).

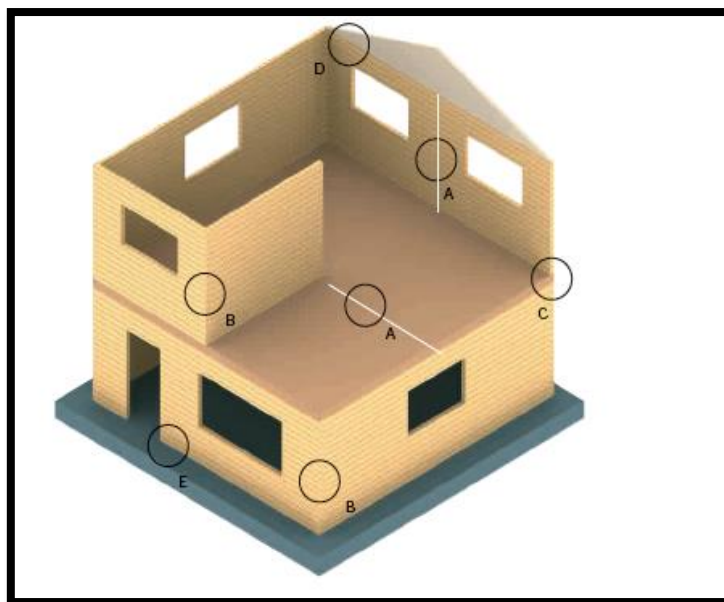


**Figura 4. (a) Curva típica de respuesta estructural para sistemas sujetos a cargas horizontales; (b) Definición de resistencia o capacidad estructural; (c) definición de ductilidad estructural (Elnashai & Di Sarno, 2008).**

## 2.2 Tipologías de sistema de conexión utilizados en la unión muro-losa de paneles CLT.

Las conexiones en las estructuras construidas con CLT, desempeñan un rol esencial en el aporte de resistencia, rigidez, estabilidad, disipación de energía y ductilidad de la estructura; lo que trae como consecuencia, que los diseñadores dediquen una cuidadosa atención sobre estos elementos. El diseño y la fabricación eficiente de las conexiones a menudo determina el nivel de éxito de los edificios de madera al competir con otros tipos de aplicaciones estructurales, como el acero o el hormigón (CLT Handbook, 2012). Esto es particularmente importante pensando en las edificaciones de mediana a gran envergadura, en donde se utiliza solo CLT o en combinación con otros elementos de acero o hormigón.

En esta sección se revisan los tipos y esquemas de sistemas tradicionales de conexión que existen entre los paneles CLT muro-losa. *Este tipo de unión tiene como objetivo principal, traspasar esfuerzos de piso o techo hacia los muros inferiores, por lo que tiene gran relevancia frente a solicitaciones laterales como el sismo y el viento* (CLT Handbook, 2012). La Figura 5 muestra los distintos lugares de conexión dentro de un edificio de CLT, de los cuales el punto C corresponde a la conexión entre los paneles losa-muro.



**Figura 5. Lugares de conexión en un edificio de CLT. Punto C, conexión muro-losa.**

### 2.2.1 Tornillos auto perforantes.

Este método de unión es el más simple para la conexión de un panel de piso a las paredes de abajo, se utilizan largos tornillos auto perforantes impulsados directamente desde el piso de forma perpendicular al panel o con un ángulo de inclinación para maximizar la capacidad de sujeción a la pared de CLT, como se muestra en la Figura 6 siguiente.

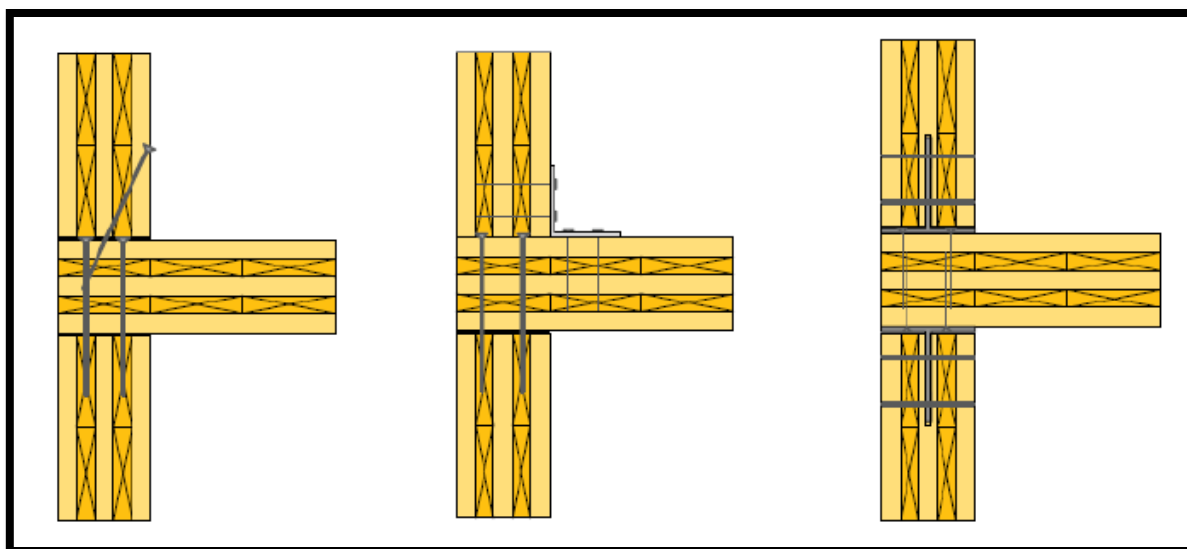
Para la conexión de las paredes de arriba se aplica el mismo principio de los tornillos auto perforantes impulsados en ángulo cerca de la unión con el suelo. Dependiendo del ángulo y la longitud, los tornillos auto perforantes pueden llegar a los muros de abajo, lo que termina por reforzar más la conexión entre los muros superiores e inferiores con el piso. Sin embargo, este tipo de conexión tiene una capacidad sísmica relativamente baja en términos de resistencia y rigidez (Popovski, 2010).

### 2.2.2 Soportes metálicos.

Este tipo de conexión se utiliza a menudo para conectar las losas a los muros de encima y abajo para transferir las cargas laterales desde el diafragma a los muros de corte. También se utilizan para la conexión de los techos a los muros. Los soportes metálicos se pueden fijar a los paneles de piso y a los muros superiores e inferiores de CLT utilizando clavos o tonillos para madera. Tal como se ilustra en la Figura 6.

### 2.2.3 Placas metálicas ocultas.

Para establecer la conexión muro-losa, se pueden utilizar placas metálicas ocultas, como se muestra en la Figura 6. Este sistema tiene considerables ventajas sobre las placas y soportes expuestos, específicamente cuando se trata de la resistencia al fuego. Aunque en su contra juega la precisión de los cortes que se le deben ejecutar al panel, usando tecnología de control numérico.



(a)

(b)

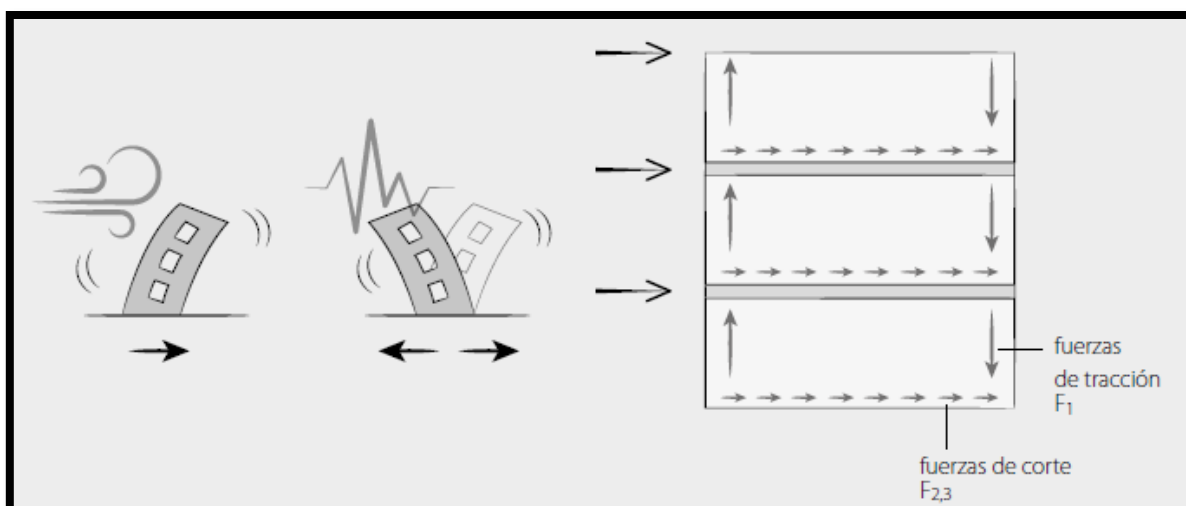
(c)

**Figura 6. Conexión típica para paneles CLT muro-losa: (a) conexión con tornillos auto perforantes; (b) conexión con soportes metálicos; (c) conexión con placas metálicas ocultas. (FPInnovations, 2013).**

### 2.3 Métodos de diseño de conexiones en madera.

Estudiar y caracterizar el comportamiento de las conexiones metálicas usadas tradicionalmente, tiene como objetivo implícito la reducción de la vulnerabilidad sísmica en las construcciones de madera en general.

En la etapa de proyecto de un edificio es necesario tener en cuenta el comportamiento del mismo tanto para acciones de tipo vertical como para acciones de tipo horizontales, como el viento y los terremotos. Las acciones horizontales generan en el interior del edificio fuerzas de corte y de tracción entre los distintos elementos estructurales; *tales fuerzas tendrán que ser absorbidas por conexiones idóneas oportunamente diseñadas y puestas en obra*. Ver Figura 7. Para lograr un diseño estructural adecuado y garantizar un óptimo rendimiento sísmico de un edificio de madera, es fundamental que el proyectista tenga el conocimiento experimental real tanto en términos de rigidez como en términos de ductilidad para lograr un proyecto apropiado de todos los sistemas de conexión.



**Figura 7. Acciones de tipo horizontal y distribución de las solicitaciones, en un edificio de madera.**

Johansen (1949) investigó el comportamiento en las conexiones de tipo clavija y creó los modos de fluencia que incorpora los efectos de la resistencia de aplastamiento de la madera y la resistencia a flexión de las clavijas para predecir el rendimiento de las conexiones. En la actualidad existen varios códigos de diseño y modelos analíticos para predecir el comportamiento de una unión en madera, los cuales se basan en los modos de fluencia de Johansen.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, las conexiones son cruciales para proporcionar resistencia, rigidez y ductilidad a la estructura. En este capítulo se presentan metodologías de diseño actuales para conexiones convencionales de madera y las posibles diferencias para el diseño de uniones en CLT.

### 2.3.1 Norma Chilena “Madera – Construcciones en madera – Cálculo” (NCh 1198:2014).

Las ecuaciones presentadas en la norma NCh 1198:2014 se utilizan para predecir el comportamiento en las conexiones de cizalle simple, doble y extracción directa. Se presentan cuatro modos de fluencia principales para determinar la capacidad admisible de carga lateral de un medio de unión, que corresponde al menor valor  $P_{el,ad}$  resultante de las expresiones de los modos de fluencia que se indican en la Tabla 1 y se visualizan en la Figura 8. Caracterizados por:



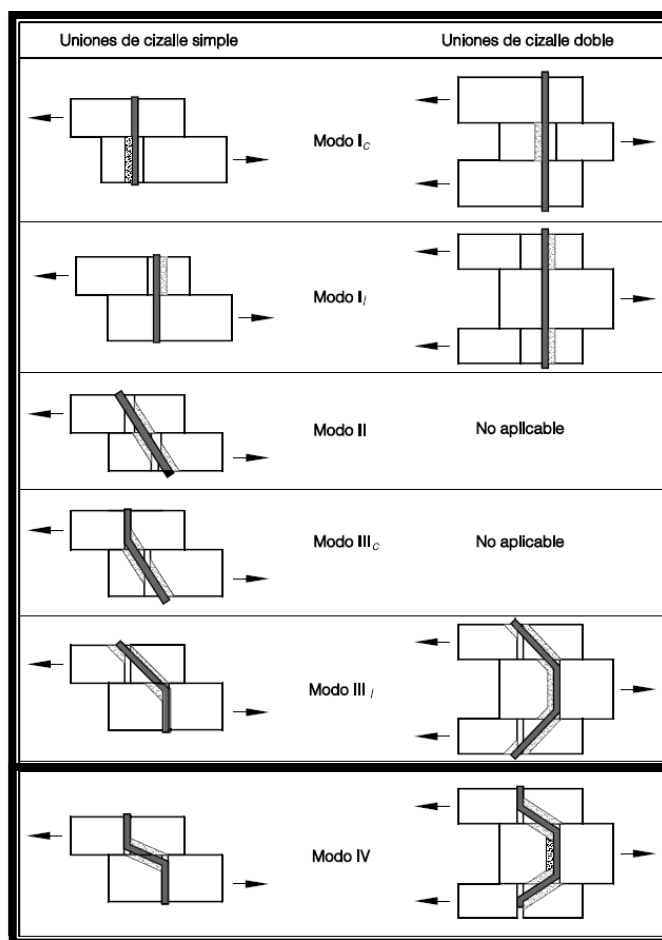
- Modo I: aplastamiento en los elementos de tal manera que el conector tritura los miembros en contacto. Esta falla puede ocurrir tanto en el miembro principal (Modo I<sub>c</sub>) como el miembro lateral (Modo I<sub>l</sub>) (madera y acero respetivamente).
- Modo II: el conector pivota (gira) en la madera sin ceder. Hay aplastamiento localizado en el de miembro madera. Este modo de falla es único en conexiones de cizalle simple.
- Modo III: se produce una rotula plástica en el conector combinado con el aplastamiento en el elemento principal (Modo III<sub>c</sub>) o en el elemento lateral (III<sub>l</sub>). Este modo de falla es único en conexiones de cizalle simple.
- Modo IV: se producen dos rotulas plásticas en el conector, con aplastamiento localizado en las piezas principales y laterales cerca del plano de cizalle.

El valor de carga admisible solicitado a extracción lateral usando los modelos de fluencia es una función de los siguientes parámetros:

- El diámetro nominal del medio de unión, D (mm).
- Resistencia de aplastamiento de la pieza ppal. y lateral, R<sub>ap, c</sub> y R<sub>ap, l</sub> (MPa).
- Tensión de fluencia en flexión del medio de unión, F<sub>ff</sub> (MPa).
- La longitud de apoyo del medio de unión en la pieza ppal. y lateral, l<sub>c</sub> y l<sub>l</sub> (mm).
- Especie maderera.

**Tabla 1. Ecuaciones para los modelos de fluencia de los medios de unión solicitados en extracción lateral (NCh 1198:2014).**

Uniones de cizalle simple		Uniones de cizalle doble	
Modo I <sub>c</sub>	$P_{el} = \frac{D \times l_c \times R_{ap,c}}{FA}$	Modo I <sub>c</sub>	$P_{el} = \frac{D \times l_c \times R_{ap,c}}{FA}$
Modo I <sub>l</sub>	$P_{el} = \frac{D \times l_l \times R_{ap,l}}{FA}$	Modo I <sub>l</sub>	$P_{el} = \frac{2 \times D \times l_l \times R_{ap,l}}{FA}$
Modo I	$P_{el} = \frac{k_1 \times D \times l_l \times R_{ap,l}}{FA}$		-
Modo III <sub>c</sub>	$P_{el} = \frac{k_2 \times D \times l_c \times R_{ap,c}}{(1 + 2 \times R_e) \times FA}$		-
Modo III <sub>l</sub>	$P_{el} = \frac{k_3 \times D \times l_l \times R_{ap,c}}{(2 + R_e) \times FA}$	Modo III <sub>l</sub>	$P_{el} = \frac{2 \times k_3 \times D \times l_l \times R_{ap,c}}{(2 + R_e) \times FA}$
Modo IV	$P_{el} = \frac{D^2}{FA} \sqrt{\frac{2 \times R_{ap,c} \times F_{ff}}{3 \times (1 + R_e)}}$	Modo IV	$P_{el} = \frac{2 \times D^2}{FA} \sqrt{\frac{2 \times R_{ap,c} \times F_{ff}}{3 \times (1 + R_e)}}$



**Figura 8. Modos de fluencia en uniones de madera con elementos de fijación mecánicos (NCh 1198:2014)**

El diseño estructural debe evitar el uso de clavos solicitados por fuerzas orientadas según la dirección del eje del clavo. Cuando esto no sea posible, se deben aplicar las disposiciones que se indican en 9.6.3.3.2 y 9.6.3.3.3 (NCh 1198:2014). La capacidad admisible de carga a extracción directa de un clavo se obtendrá de la Ecuación 1:

$$P_{ed,ad} = 9 \times \rho_{0,k}^{\frac{5}{2}} \times D^{\frac{3}{2}} \times p \times 10^{-3} \text{ [kN]} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

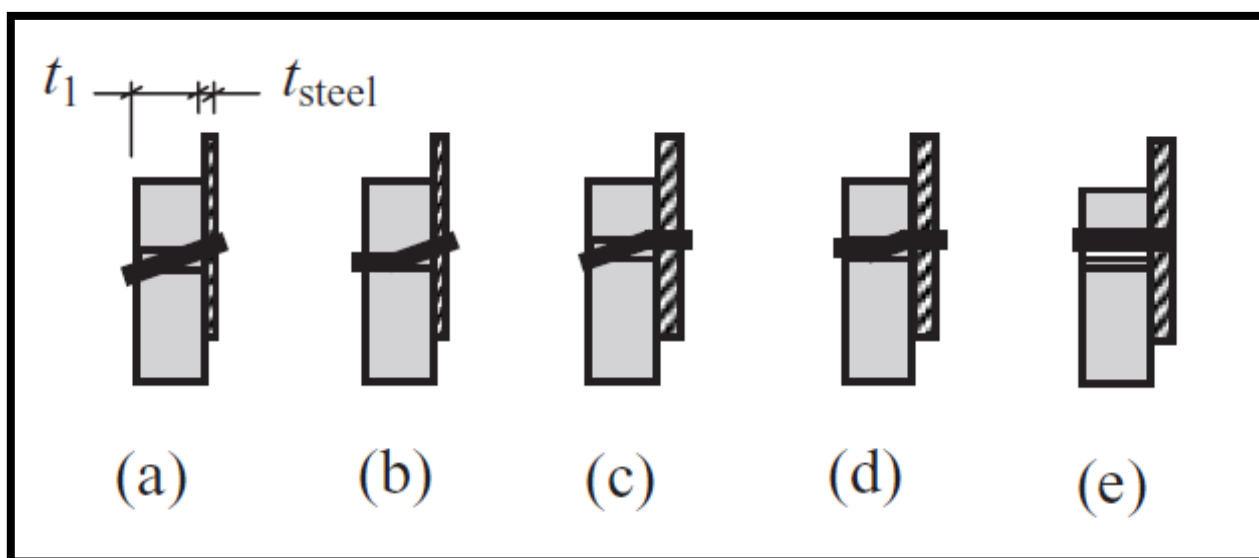
$\rho_{0,k}$  = densidad anhidra característica (g/cm<sup>3</sup>).

p = penetración del clavo (mm).

D = diámetro del clavo (mm).

### 2.3.2 Euro código 5 “Diseño de madera estructural” (EC5)

Se presentan 5 potenciales modos de falla para determinar la capacidad de carga característica de la unión madera-acero en cizalle simple (ver Figura 9), los cuales dependen de la geometría de la conexión, de la resistencia al aplastamiento de la madera, de la resistencia a la flexión del elemento de fijación y además depende del espesor de la placa metálica. Cuando el espesor de la placa metálica es menor o igual a 0.5d se clasifica como delgada y cuando el espesor de la placa es mayor a d se clasifica como placa gruesa.



**Figura 9. Modos de fallas para conexiones acero-madera, según EC5.**

Para el caso de la conexión a cizalle simple con placas metálicas clasificada como delgada, la capacidad característica de carga está dada por la siguiente expresión (ver Ecuación 2):

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,4 \times f_{h,k} \times t_1 \times d \\ 1,15 \times \sqrt{2 \times M_{y,Rk} \times f_{h,k} \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad \text{Ecuación 2.}$$

Existiendo dos posibles modos de falla: (a) falla por aplastamiento en la madera y (b) se produce una rotula plástica en el elemento de fijación.

En el caso contrario, con la placa metálica clasificada como gruesa, se presentan tres tipos de fallas: (c) se produce una rotula plástica en el conector, (d) se producen dos rotulas plásticas en el elemento de fijación. y (e) falla por aplastamiento en la madera. La capacidad de carga característica está dada por la siguiente expresión (ver Ecuación 3):

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} \times t_1 \times \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,k} \times d \times t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,k} \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ f_{h,k} \times t_1 \times d \end{array} \right. \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

$F_{v,Rk}$  = es la capacidad característica de carga (N).

$f_{h,k}$  = es la resistencia característica de aplastamiento o incrustación en la madera (N/mm<sup>2</sup>).

$t_1$  = es la profundidad de penetración.

$d$  = es el diámetro de conector (mm).

$M_{y,Rk}$  = es el momento plástico característico (N-mm.).

$F_{ax,Rk}$  = es la capacidad característica a extracción del conector (N).

### 2.3.3 Uibel y Blaß.

A diferencia de los códigos de diseños mencionados anteriormente, Uibel y Blaß llevaron a cabo extensas investigaciones con el fin de establecer la resistencia al cizallamiento de los elementos de sujeción en CLT, teniendo en cuenta la laminación cruzada, la naturaleza estructurada del panel, además de características únicas del panel tales como el encolado de los bordes y la presencia potencial de ranuras aserradas en las placas para aliviar las tensiones de secado; principales diferencias entre las conexiones tradicionales de madera sólida y las conexiones en CLT que complican la determinación de la capacidad de fijación en paneles CLT.

Bajo la base de los resultados de las pruebas para establecer la resistencia bajo carga lateral del conector tipo pasador, se obtuvieron ecuaciones características de resistencia al aplastamiento de la madera y resistencia de extracción del sujetador expresadas como una función del diámetro del de los sujetadores, la densidad de la madera y el ángulo de carga con respecto a la dirección del grano de la lámina superficial.

Para conectores tipo pasador accionados perpendicularmente al plano del panel y cargados en cizalle de 4 mm de diámetro, Uibel y Blaß derivaron la fórmula de capacidad característica del aplastamiento en el panel CLT con laminaciones de menos de 7 mm de espesor (Ecuación 4). La ecuación característica de la fuerza de aplastamiento propuesta es independiente de la dirección de la carga con respecto a la orientación del grano de las capas del panel. Una vez establecida esta resistencia, se puede determinar la capacidad de carga de la fijación de acuerdo a los modelos de fluencia de Johansen's dispuestos en el EC5. La validez de la Ecuación 4 debe comprobarse, ya que los espesores de la laminación comúnmente difieren del espesor empleado por Uibel y Blaß.

$$f_{h,k} = 0,112 \times d^{-0,5} \times \rho_k^{1,05} [N/mm^2] \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

$f_{h,k}$  = es la resistencia característica de aplastamiento o incrustación en la madera (N/mm<sup>2</sup>)

$d$  = es el diámetro de conector (mm).

$\rho_k$  = es la densidad característica de panel (kg/m<sup>3</sup>).

### 3 MATERIALES Y METODOS.

En este capítulo se exponen los métodos y materiales utilizados en las pruebas de la conexión muro-losa de paneles CLT. El propósito de esta investigación es evaluar el desempeño estructural de la conexión. Las siguientes secciones describen protocolos de carga, materiales y las configuraciones de las pruebas con el fin de aplicar al conector objeto de la investigación acciones monotónicas y cíclicas.

#### 3.1 Materiales.

##### 3.1.1 CLT de pino radiata.

Las probetas sometidas a ensayos corresponden a paneles CLT fabricados con piezas de madera de pino radiata con una escudriña de 35x90 mm., unidas con un adhesivo de poliuretano de dos componentes (SikaForce-7710 L100), lográndose las siguientes dimensiones: 480x420x90 mm y 480x390x90 para muro y losa respectivamente (ver Figura 10). Dicha fabricación se llevó a cabo en las dependencias del laboratorio diseño y tecnología de la madera (LADITEMA) de la Universidad del Bio-Bio. Para los muros, se utilizaron paneles de 3 capas con espesor de 90 mm. Mientras que los paneles que representan a la losa, por limitaciones de material, también fueron de 3 capas con un espesor total de 90 mm. Además, las probetas de CLT fueron acondicionadas en condiciones controladas y posteriormente ensayadas de acuerdo a la norma EN 26891 (temperatura de 20 °C  $\pm$ 2, humedad relativa 65%  $\pm$ 5).



**Figura 10. Panel CLT.**

### 3.1.2 Adhesivo SikaForce-7710 L100.

Para la fabricación de las probetas de CLT se utilizó un adhesivo de poliuretano de dos componentes, el cual tiene como beneficio el curado a temperatura ambiente. Al ser un adhesivo no testeado previamente, se realizaron ensayos para determinar la resistencia a cizalle de la línea de cola de acuerdo a la norma NCh 2148 of. 89. (véase Anexo A).

### 3.1.3 Clavo Anker.

Los medios de unión utilizados fueron clavos anulares Anker tipo LBA460, con dimensiones 4x60 mm de la firma italiana Rothoblaas. Posee una resistencia característica a la tracción de  $f_{tens,k}=6,9$  kN, según información presente en la Figura 11. Más valores característicos se muestran en la figura 12.

LBA		LBS		LBA		
				4	6	5
Diámetro nominal		$d_1$	[mm]	4	6	5
Diámetro cabeza		$d_k$	[mm]	8,00	12,00	7,80
Diámetro núcleo		$d_2$	[mm]	-	-	3,00
Diámetro bajo cabeza		$d_{uk}$	[mm]	-	-	4,90
Diámetro externo		$d_e$	[mm]	4,40	6,50	-
Espesor cabeza		$t_1$	[mm]	1,40	2,00	2,40
Diámetro agujero guía		$d_v$	[mm]	3,0	4,5	3,0
Momento plástico característico		$M_{p,k}$	[Nmm]	6500,0	19000,0	5417,2
Parámetro característico de resistencia a la extracción		$f_{ax,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,5	7,5	11,7
Parámetro característico de penetración de la cabeza		$f_{head,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	10,5
Resistencia característica a la tracción		$f_{tens,k}$	[kN]	6,9	11,4	7,9

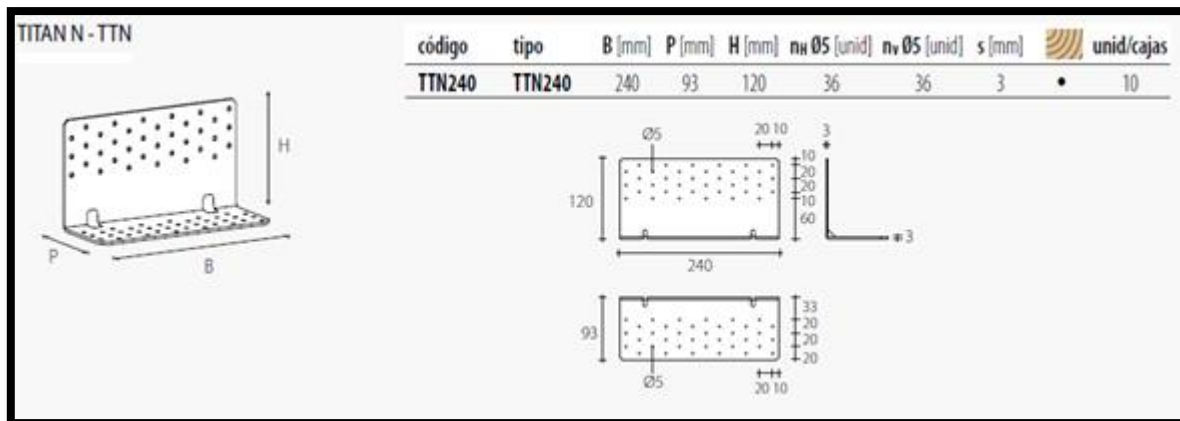
Figura 11. Geometría y características mecánicas, clavo Anker LBA 4x60 mm., según catalogo Rothoblaas (2015).

			VALORES CARACTERÍSTICOS <sup>(1)</sup>								VALORES ADMISIBLES		
$d_1$ [mm]	L [mm]	b [mm]	CORTE ACERO-MADERA $R_{V,k}$ [kN]								TRACCIÓN $R_{ax,k}$ [kN]	CORTE $V_{adm}$ [kg]	TRACCIÓN $N_{adm}$ [kg]
			SPLATE 1,5 mm	SPLATE 2 mm	SPLATE 2,5 mm	SPLATE 3 mm	SPLATE 4 mm	SPLATE 5 mm	SPLATE 6 mm				
4	40	30	2,02	2,01	2,00	1,98	1,95	1,93	1,90	0,96	71	38	
	50	40	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	1,28	71	51	
	60	50	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	1,60	71	64	

Figura 12. Valores característicos y admisibles, clavo Anker LBA 4x60 mm., según catalogo Rothoblaas (2015).

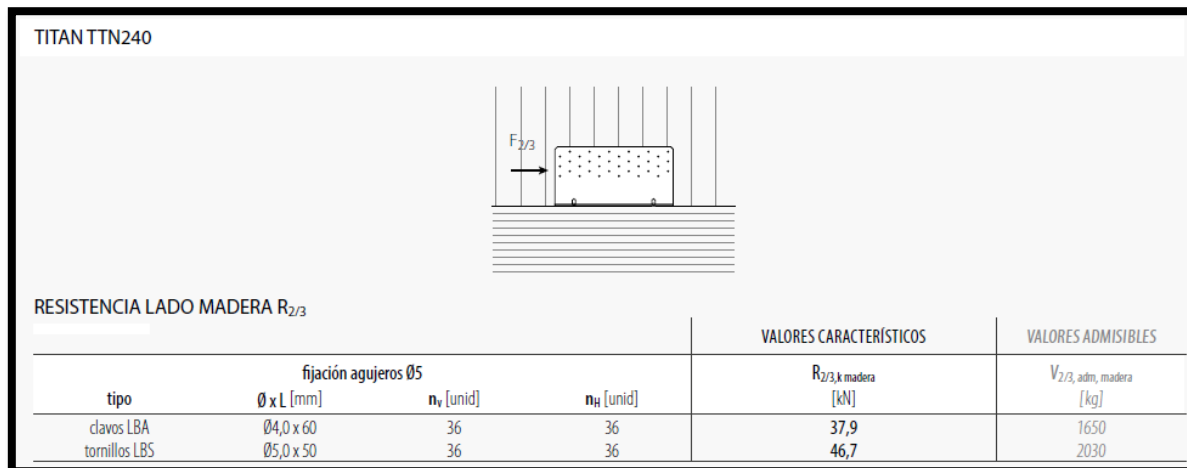
### 3.1.4 Herraje Angle Bracket.

Se utilizó el conector TTN240 de la empresa Rothoblaas, donde sus dimensiones y geometría se presentan en la Figura 13 siguiente, de acuerdo a lo presentado en el catálogo 2015 de la empresa.



**Figura 13. Dimensiones y Geometría de conector angle bracket TTN240, según catalogo Rothoblaas (2015).**

También es posible encontrar información respecto a valores característicos y admisibles, de acuerdo a la Figura 14, con 36 clavos Anker 4x60 mm en ambos lados (horizontal y vertical) la resistencia del lado madera  $R_{2/3, k \text{ madera}} = 37,9 \text{ KN}$ .



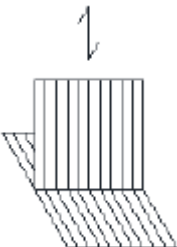
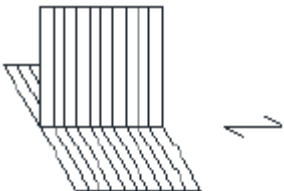
**Figura 14. Valores característicos y admisibles para el angle bracket TTN240, según catalogo Rothoblaas (2015).**



### 3.2 Configuración de ensayos.

La investigación experimental para caracterizar el comportamiento de una conexión muro-losa de paneles CLT de pino radiata se divide en dos partes principales: (i) pruebas bajo carga monotónicas en conectores tipo angle bracket, con el objetivo de conocer los valores de entrada para los ensayos cíclicos; (ii) pruebas bajo cargas cíclicas en conectores tipo angle bracket; ambas en dos direcciones: corte y tensión, con la finalidad de conocer la resistencia, rigidez y ductilidad de la unión. La conexión es panel a panel, que representa la unión de los paneles muro y losa en los pisos superiores de edificaciones de CLT.

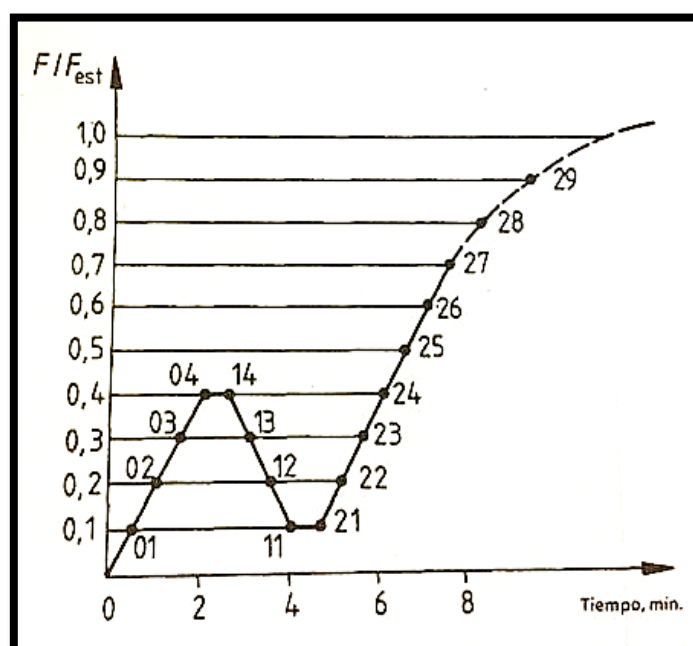
**Tabla 2. Matriz de ensayos para conectores tipo Angle Brackets.**

Configuración de ensayo	Dirección de carga	Tipo y numero de sujetador
	Tensión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angle bracket: Titan TTN240.</li> <li>• Muro: 12 clavos anulares tipo Anker <math>\Phi 4 \times 60</math> mm.</li> <li>• Losa: 12 clavos anulares tipo Anker <math>\Phi 4 \times 60</math> mm.</li> </ul>
	Corte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angle bracket: Titan TTN240.</li> <li>• Muro: 12 clavos anulares tipo Anker <math>\Phi 4 \times 60</math> mm.</li> <li>• Losa: 12 clavos anulares tipo Anker <math>\Phi 4 \times 60</math> mm.</li> </ul>

### 3.2.1 Ensayos bajo cargas monotónicas.

Todos los ensayos monotónicos se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento de carga estándar para la determinación de las características de resistencia y deslizamiento de uniones realizadas con elementos de fijaciones mecánica de acuerdo a la sección 8 de la norma EN 26891, cuyo procedimiento se muestra en la Figura 15. Todos los resultados experimentales se evaluaron de acuerdo a la norma EN 26891. Para mayor información respecto al protocolo de carga revisar Anexo C.

Pruebas monotónicas de corte y tracción se llevaron a cabo sobre Angle bracket usados para conectar los paneles muro a los paneles losa en los pisos superiores de una edificación de CLT.



**Figura 15. Procedimiento de carga para ensayos monotónicos de uniones con conectores mecánicos, según EN 26891,1991.**

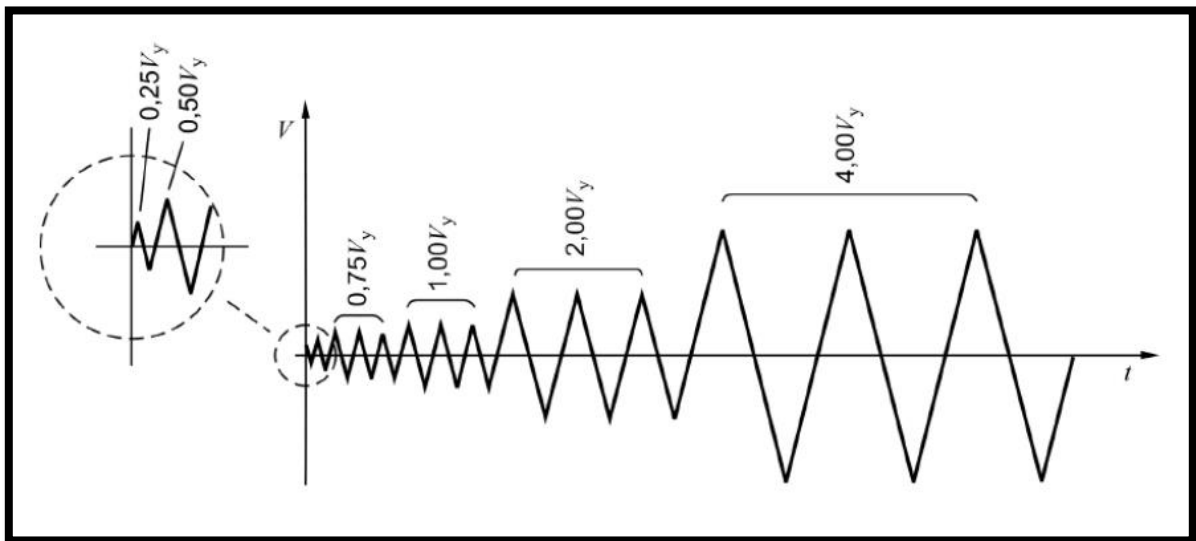
Todas las pruebas se realizaron utilizando los angle brackets modelo Titan TTN240 conectados a probetas de CLT fabricados de pino radiata. Para los muros y losas, se utilizaron paneles de 3 capas de 90 mm de espesor, con la siguiente acumulación 30-30-30 en mm.

En el lado del muro, el angle bracket se fijó al panel con 12 clavos anulares Anker 4x60 mm y en el lado de la losa se fijó con 12 clavos anulares Anker 4x60 mm.

Las configuraciones de los ensayos se muestran en las Figuras 17 y 18.

### 3.2.2 Ensayos bajo cargas cíclicas.

Todos los ensayos bajo cargas cíclicas se llevaron a cabo siguiendo un procedimiento estándar para ensayos cíclicos de uniones realizadas con conectores mecánicos prescrito en la norma EN 12512, cuyo protocolo de carga se muestra en la Figura 16. Los ensayos de corte se realizaron mediante un procedimiento cíclico inverso con valores predefinidos, dependiendo de los valores experimentales obtenidos de las pruebas monotónicas. Sin embargo, las pruebas de tensión se sometieron a una modificación no inversa del procedimiento descrito en la norma EN 12512 debido al movimiento restringido en la dirección de la compresión. Básicamente, el desplazamiento se ciclo desde cero a un valor positivo (tracción) sin incursionar en los valores negativos (compresión). Para mayor información, véase anexo C.



**Figura 16. Protocolo de carga para ensayos cíclicos de uniones con conectores mecánicos, según EN 12512,2001.**

Las pruebas cíclicas se llevaron a cabo sobre angle brackets usados para conectar los paneles muro a los paneles losa de los pisos superiores de una edificación de CLT. Se utilizaron los angle brackets modelo Titan TTN240. En el lado de muro, el angle bracket se fijó al panel con 12 clavos anulares Anker 4x60 mm y en el lado de la losa con 12 clavos anulares Anker 4x60 mm. Todas las pruebas se realizaron utilizando paneles CLT hechos de pino radiata. Para los muros y losas, se utilizaron paneles de 3 capas de espesor 90 mm, con la siguiente acumulación 30-30-30 en mm.

Las configuraciones de los ensayos se muestran en las Figuras 17 y 18.

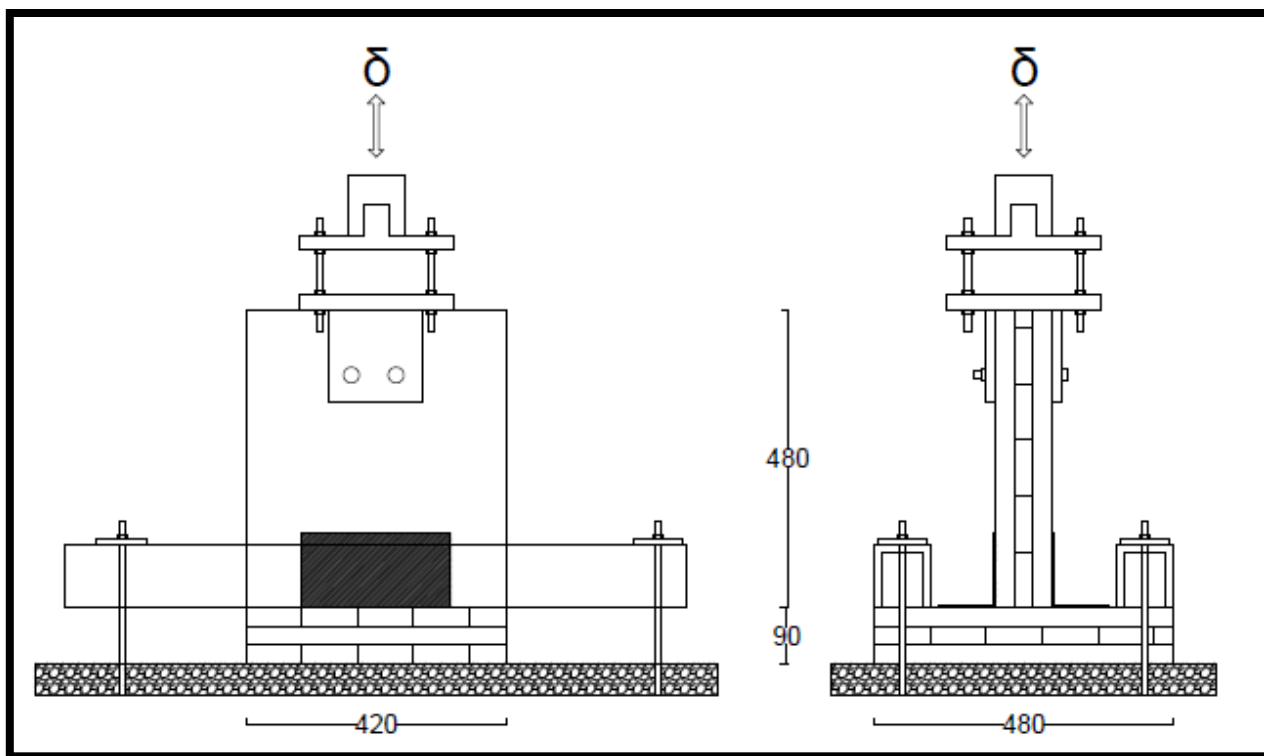


Figura 17. Configuración de prueba para conexión muro-losa del angle bracket cargado en tensión.

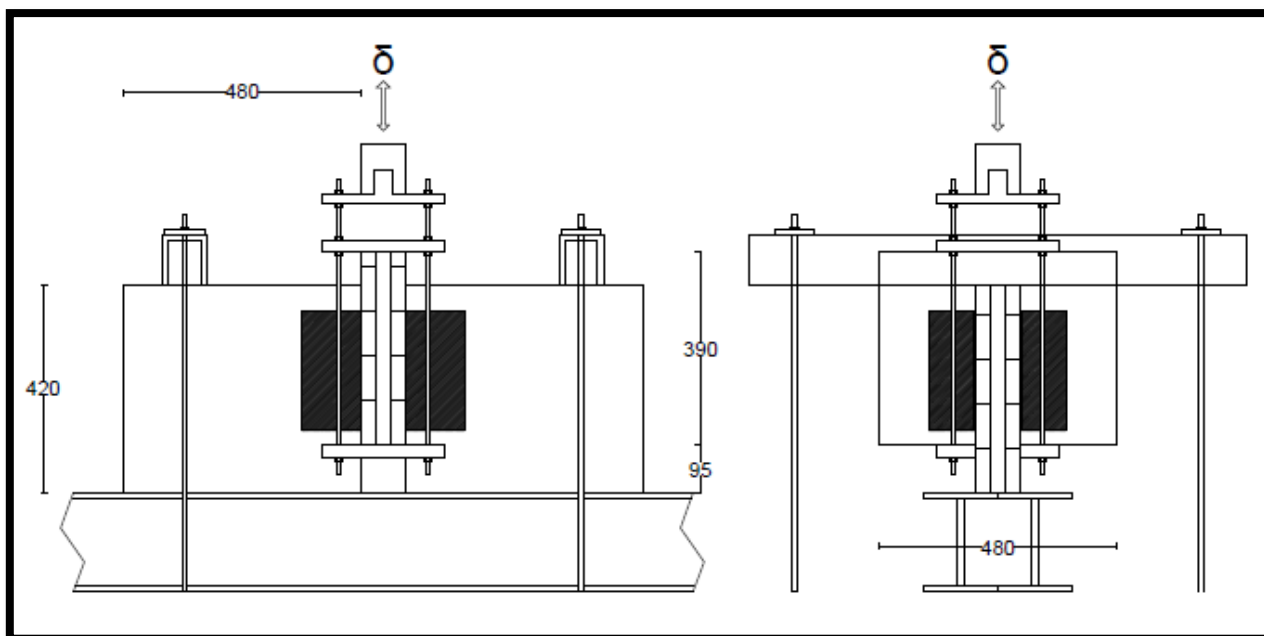


Figura 18. Configuración de prueba para conexión muro-losa del angle bracket cargado en corte.

## 4 ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.

En este capítulo se presentan y discuten algunos de los resultados de las pruebas experimentales sobre los conectores, una comparación de estos con predicciones de distintos modelos analíticos siguiendo los códigos de diseño existentes.

### 4.1 Etapa experimental.

En esta sección, algunos de los resultados de la serie de pruebas monotónicas y cíclicas realizadas sobre la conexión objeto de estudio se presentan y discuten de manera crítica.

Los valores de las propiedades mecánicas se analizaron teniendo en cuenta ambos lados de las curvas de histéresis, el valor medio de una configuración se obtuvo mediante el cálculo del promedio del total de las pruebas cíclicas y monotónicas dentro de la configuración especificada. Basado en una estadística de los resultados se calculó la desviación estándar de las propiedades mecánicas.

Los resultados de las pruebas experimentales se evaluaron en términos de resistencia, rigidez y ductilidad, siguiendo el procedimiento estándar de la norma EN 12512 (2001).

Evaluación de propiedades mecánicas:

- $F_{m\acute{a}x}$  y  $v_{m\acute{a}x}$  denotan la carga máxima y el desplazamiento para dicha carga.
- $F_y$  y  $v_y$  significan carga plástica y desplazamiento plástico.
- $F_u$  y  $v_u$  son la carga final y el desplazamiento final.
- $K_{el}$  y  $k_{pl}$  representan la rigidez inicial (elástica) y rigidez plástica.
- $D$  significa la relación de ductilidad (relación entre el desplazamiento final y el desplazamiento plástico).

#### 4.1.1 Resultados de las pruebas monotónicas.

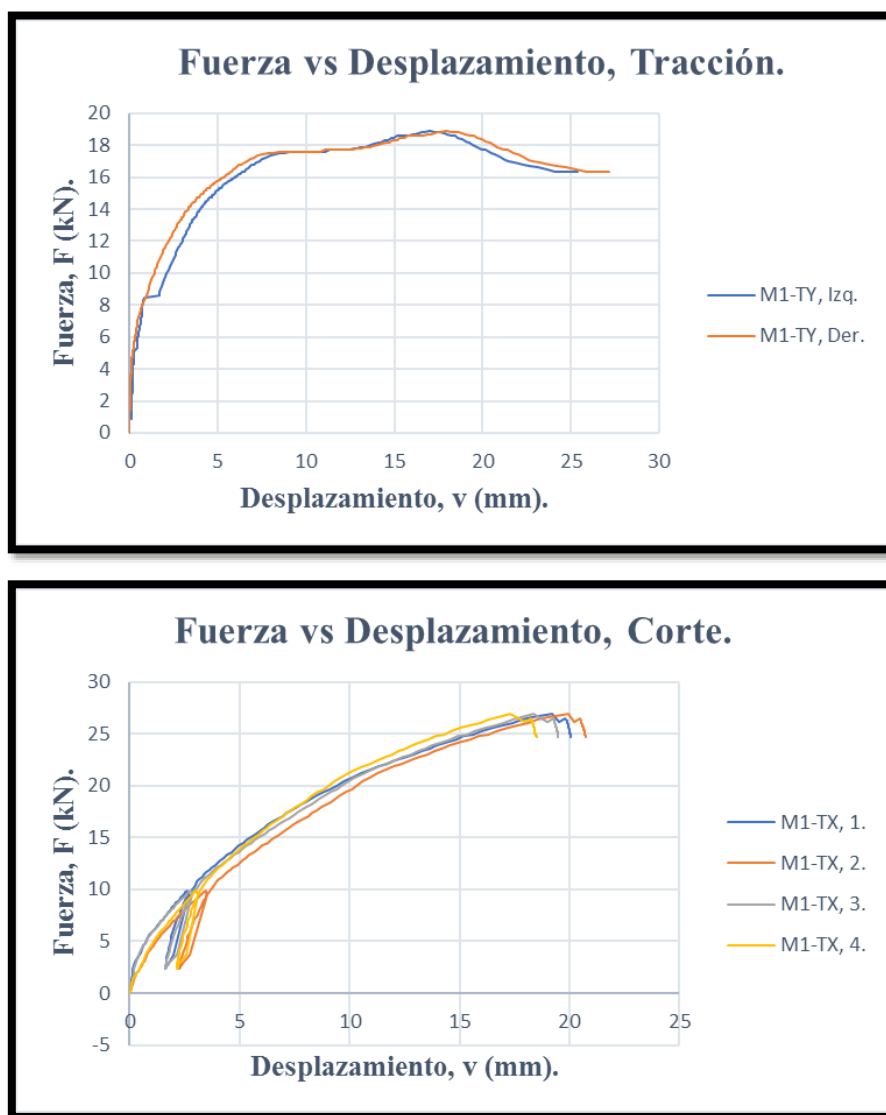
El objetivo de la realización de estos ensayos monotónicos o unidireccionales, como ya se mencionó anteriormente, fue la obtención del parámetro de entrada para la calibración de las pruebas cíclicas. Se obtuvieron los desplazamientos de fluencia ( $v_y$ ) para ambas configuraciones de ensayos propuestos, además se evaluaron distintas propiedades de acuerdo a lo prescrito en la norma de referencia.

De la Tabla 3, se observan los valores promedios de las distintas propiedades mecánicas analizadas para ambas configuraciones de ensayo. En tensión se obtuvo una rigidez elástica ( $k_{el}$ ) promedio de 10,11 [kN/mm], con una fuerza y desplazamiento de fluencia promedio de 8,10 [kN] y 0,74 [mm] respectivamente. En términos de ductilidad, en tensión se obtuvo numéricamente un promedio de 35,89, sin embargo, en la práctica se debe evitar que los clavos queden solicitados en su eje y la extracción directa de estos se considera como un modo de falla frágil.

En cizalle se obtuvo una rigidez elástica promedio de 2,61 [kN/mm], con una fuerza y desplazamiento de fluencia promedio de 21,66 [kN] y 7,64 [mm] respectivamente. En términos de ductilidad si bien numéricamente es bastante aceptable ( $D=2,61$ ), lo más probable es que de no ser porque el pistón hidráulico se quedó sin recorrido, se hubiese obtenido un mayor desplazamiento último o final y por ende una mayor ductilidad. En la Figura 19 se muestran las curvas de carga monotónica típicas para los angle bracket cargados tanto en tracción como en corte.

**Tabla 3. Propiedades mecánicas estáticas de los conectores Angle Bracket, según EN 12512:2001.**

<b>Configuración de ensayo monotónico.</b>				
	Tensión		Corte	
<b>Propiedades mecánicas.</b>	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
<b><math>k_{el}</math> [kN/mm]</b>	10,11	0,26	2,61	0,2
<b><math>k_{pl}</math> [kN/mm]</b>	1,69	0,04	0,43	0,03
<b><math>F_y</math> [kN]</b>	8,10	0,53	21,66	0,67
<b><math>v_y</math> [mm]</b>	0,74	0,05	7,64	1,02
<b><math>F_{max}</math> [kN]</b>	18,87	0,00	26,88	0,00
<b><math>v_{max}</math> [mm]</b>	17,55	0,67	18,71	1,13
<b><math>F_u</math> [kN]</b>	16,37	0,00	24,62	0,00
<b><math>v_u</math> [mm]</b>	26,28	1,27	19,71	0,94
<b>D</b>	35,89	4,15	2,61	0,30



**Figura 19. Curvas monotónicas típicas para angle bracket cargados en tracción y corte.**

En términos de resistencia, los angle brackets cargados en tensión presentaron una capacidad relativamente alta, considerando que su dirección principal de transporte de carga es el cizallamiento. La resistencia axial fue del orden del 70% de la resistencia al corte, 18,87 kN y 26,88 kN respectivamente en promedio (véase Tabla 3). Este porcentaje podría ser mejor si se evita el modo de falla frágil de la extracción de los clavos, por ejemplo, utilizando tornillos autoperforantes con mayor resistencia a la extracción en lugar de clavos. Aquí solo es deseable la deformación de los clavos en el panel muro, mientras que la conexión al panel losa debe permanecer elástica (Gavric I., 2013)

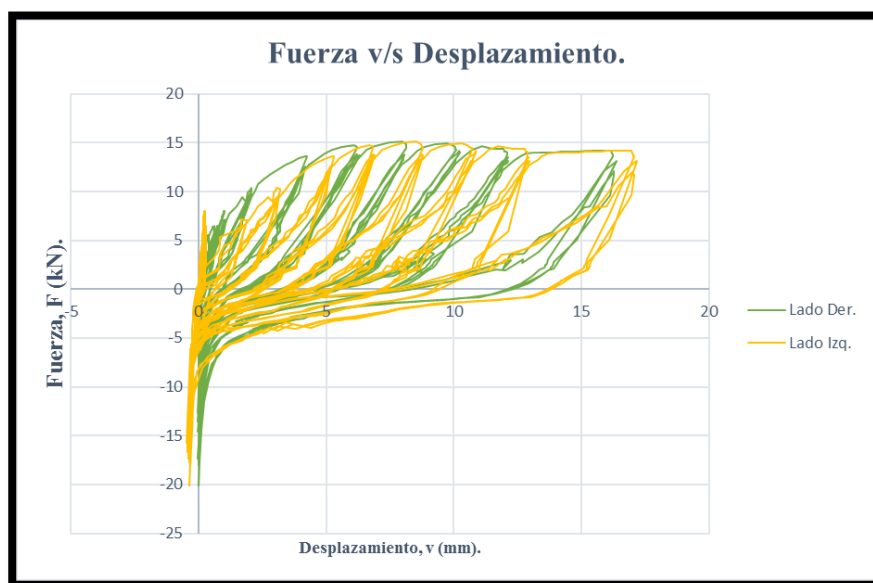
#### 4.1.2 Resultados de los ensayos cíclicos.

El corte es la dirección principal de transporte de carga de los angle bracket, sin embargo, las pruebas en dirección axial mostraron un comportamiento relativamente bueno en esta dirección. En tensión, se observó un tipo de falla frágil, ya que todas las pruebas en esta dirección del conector revelan principalmente la extracción directa de los clavos que fijan al panel CLT que representa a la losa antes de que los clavos que se fijan al panel muro comenzaran a deformarse o apenas se deforman por extracción lateral, además, se observa la desangulación de la placa metálica (véase Figura 20). Esto significa que el potencial de la capacidad de resistencia del bracket no se alcanzó y la energía liberada a través de la extracción directa de los clavos es más baja de lo que sería en el caso de una deformación dúctil con la formación de rotulas plásticas en los clavos que conectan el bracket al muro. Como se puede notar, este tipo de falla se considera como frágil y debe evitarse en el diseño de las conexiones de CLT (Gavric I., 2013). La Figura 21 muestran las curvas de histéresis típicas para angle brackets cargados en tensión (configuración de ensayo n°1), en la cual se visualizan los valores obtenidos en ambos lados de la probeta.



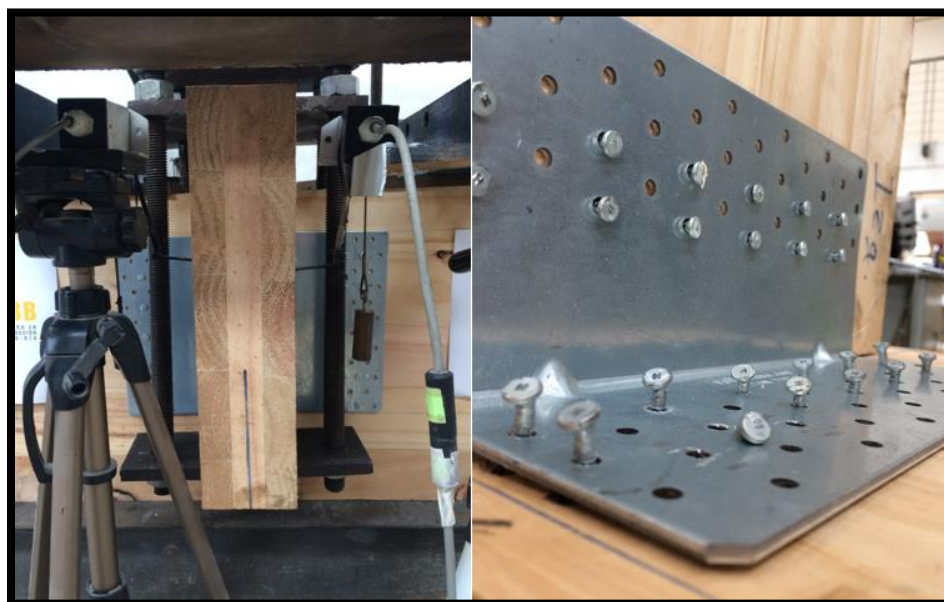
**Figura 20. Modo de falla en unión muro-losa conectado con angle bracket cargado en tracción.**



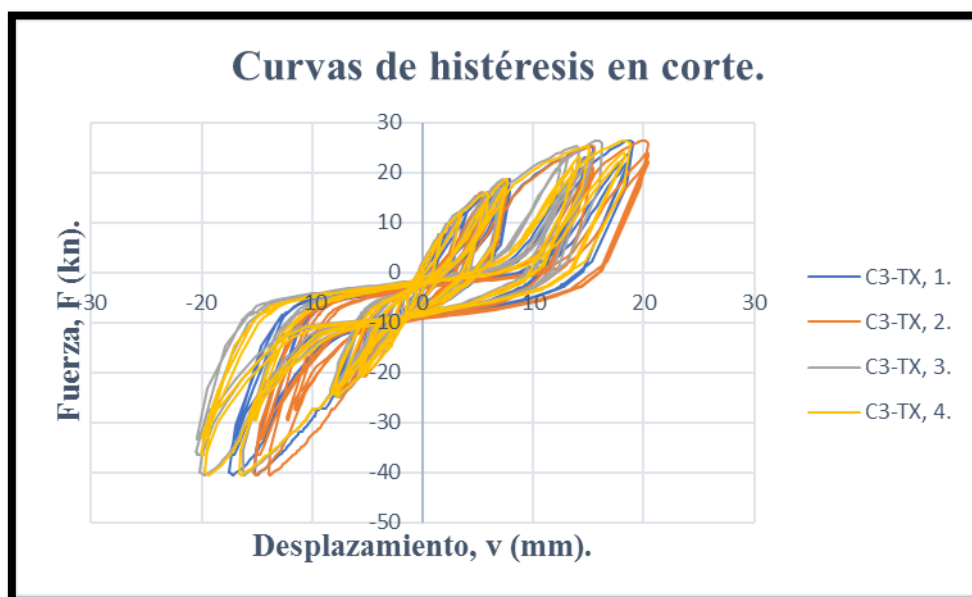


**Figura 21. Curvas típicas de histéresis del angle bracket cargado en tracción.**

Bajo cargas de corte o cizalle se observó un comportamiento cíclico diferente. El modo de falla es la formación de dos rotulas plásticas (modo de falla IV y modo de falla d, según NCh 1198 y EC5 respectivamente) en los clavos que conectan el angle bracket, ya sea al panel losa o panel muro de CLT, más el aplastamiento localizado de la madera alrededor del clavo. La Figura 22 y la Figura 23 muestran el modo de falla y las curvas de histéresis típicas para angle brackets cargados en cizalle respectivamente.



**Figura 22. Modo de falla en unión muro-losa conectado con angle bracket cargado en corte.**



**Figura 23.** *Curvas típicas de histéresis del angle bracket cargado en corte.*

Además, se obtuvieron las propiedades mecánicas de los ensayos cíclicos (ver Tabla 4). En tensión se observa una rigidez elástica promedio de 5,72 [kN/mm], con un desplazamiento y fuerza de fluencia promedio de 1,96 [mm] y 10,40 [kN] respectivamente. En cizalle se obtuvo una rigidez elástica promedio de 3,64 [kN/mm], con una fuerza y desplazamiento de fluencia promedio de 21,03 [kN] y 5,66 [mm] respectivamente.

En contraste con la evaluación de las propiedades mecánicas de los ensayos monotónicos, se observa una degradación en la rigidez y pérdida de resistencia debido a los ciclos de carga y descarga, obteniendo en tensión un punto de fluencia con mayor desplazamiento a un menor nivel de carga. Por otro lado, en corte se esperaba el mismo comportamiento, lamentablemente numéricamente se obtuvo una rigidez inicial promedio levemente superior, con un menor desplazamiento de fluencia promedio. Dicha diferencia será atribuida a la diferencia en la velocidad de carga entre los ensayos monotónicos y cíclicos en el rango elástico.

Lamentablemente no se cuenta con un dispositivo para el control de velocidad de carga y los resultados quedan sujetos a la técnica con que se emplee en el movimiento del pistón hidráulico del marco de carga.

Para revisar resultados individuales en términos de propiedades mecánicas y gráficos dirigirse al Anexo D.

**Tabla 4. Propiedades mecánicas cíclicas de los conectores Angle Bracket, según EN 12512:2001.**

<b>Configuración de ensayo cíclico.</b>				
	<b>Tensión</b>		<b>Corte</b>	
<b>Propiedades mecánicas.</b>	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
<b><math>k_{el}</math> [kN/mm]</b>	5,72	2,06	3,64	0,86
<b><math>k_{pl}</math> [kN/mm]</b>	0,95	0,34	0,61	0,14
<b><math>F_y</math> [kN]</b>	10,40	3,02	21,03	3,44
<b><math>v_y</math> [mm]</b>	1,96	1,42	5,66	0,63
<b><math>F_{max}</math> [kN]</b>	16,32	2,11	24,42	1,40
<b><math>v_{max}</math> [mm]</b>	9,12	1,88	16,73	2,05
<b><math>F_u</math> [kN]</b>	13,67	1,49	24,42	0,00
<b><math>v_u</math> [mm]</b>	16,05	1,73	16,73	2,05
<b>D</b>	11,30	6,67	2,98	0,41

En términos de resistencia, el comportamiento de los angle bracket en la dirección de tracción mostro una carga relativamente alta con respecto al hecho de que su dirección de carga principal es el cizalle. La capacidad axial media del bracket es el 67% de la resistencia al corte del soporte, una vez más, este porcentaje podría haber sido mayor, si se evita el modo de falla frágil.

Se puede concluir que los angle bracket contribuyen significativamente a la resistencia u rigidez de la articulación no solo con su resistencia al corte, sino también con su resistencia a la tensión, lo que no debe ser descuidado en el diseño de edificios de CLT (Gavric I., 2013).

## 4.2 Predicción de modelos analíticos previamente estudiados.

En esta sección se proporciona una comparación entre los valores experimentales de capacidad de carga obtenidos de las pruebas sobre la conexión CLT, los valores característicos calculados siguiendo las disposiciones de los códigos de diseño existentes, tales como la norma NCh 1198 (2014), el EC (2004) y con los nuevos valores característicos determinados mediante el uso de las ecuaciones propuestas por Uibel y Blaß (2006,2007). Todos los gráficos, resultados y análisis de las pruebas de conexión presentados en esta sección se refieren a un conector (un angle bracket).

Las propiedades de los materiales y las características geométricas de los angle bracket (Titan TTN240) y los clavos utilizados para unir los conectores metálicos a los paneles CLT se obtuvieron de la documentación de aprobación técnica europea (ETA-11/0496, 2012) y del catálogo del productor (Rothoblaas) respectivamente. Las densidades anhidras y características necesarias para la utilización de los códigos de diseño se obtuvieron del anexo normativo E de la NCh 1198, donde se indica un valor promedio de densidad anhidra igual a  $450 \text{ kg/m}^3$  y un valor característico de  $370 \text{ kg/m}^3$ .

Para los angle bracket cargados en dirección axial (Tensión) son posibles varios modos de falla:

- Extracción de los clavos en el panel losa de CLT.
- Corte de los clavos del panel muro de CLT.
- Fractura en tensión de la sección neta de acero del angle bracket.
- Fluencia en la parte del acero.

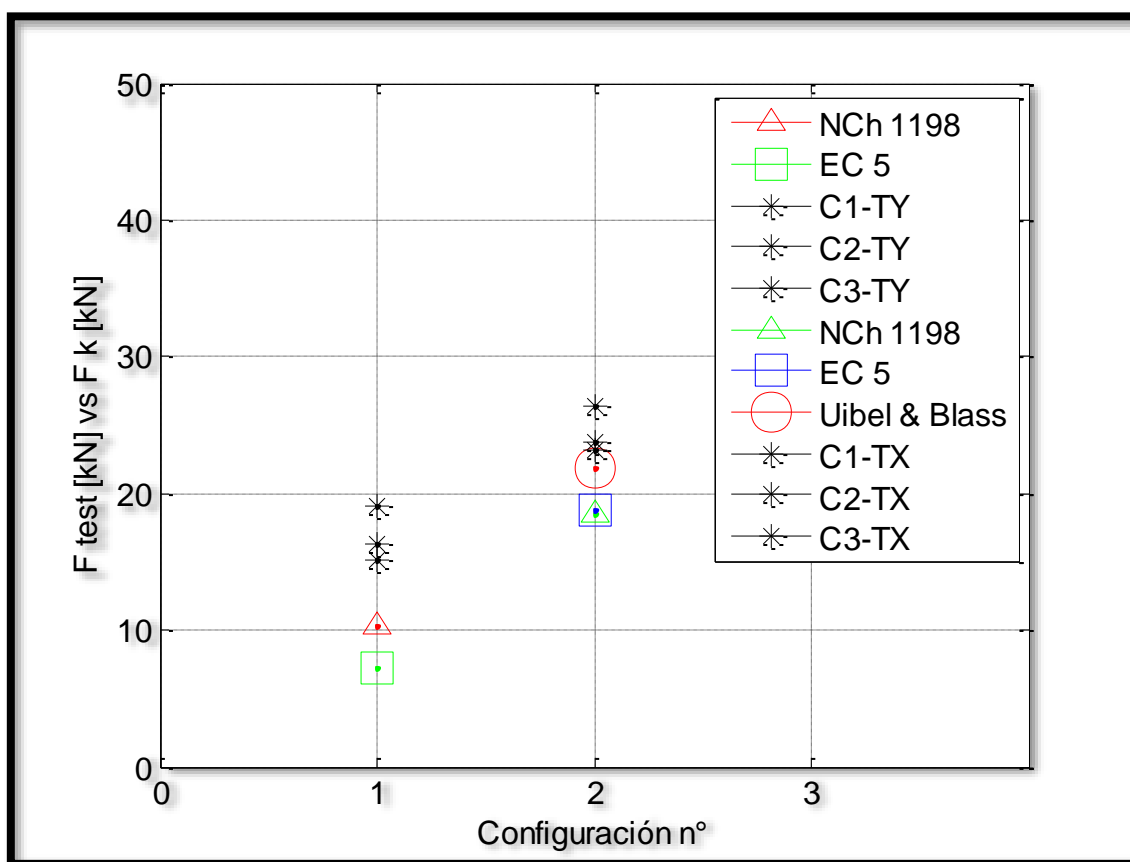
Al igual que en el caso de carga axial del angle bracket, existen también varios posibles mecanismos de falla en la dirección de cizalladura (Corte):

- Falla de corte en los clavos unidos al panel CLT muro o losa.
- Desgarro o bloque de corte del acero del angle bracket.
- Falla de la sección neta de acero del angle bracket.
- Desgarro del grupo de sujetadores.

En la Tabla 5 se muestran los valores característicos calculados con los distintos códigos de diseño y en la Figura 24 la comparación con los valores experimentales obtenidos de los ensayos.

**Tabla 5. Resistencia característica analítica del angle bracket y modo de falla previsto.**

Capacidad de resistencia característica.	Configuración 1	Configuración 2
NCh 1198	10,25 kN	18,47 kN
EC 5	7,36 kN	18,84 kN
Uibel & Bla $\beta$	-	21,89 kN
Modo de falla	Clavos en extracción	Clavos en corte



**Figura 24. Comparación entre los resultados de los ensayos experimentales y los valores característicos calculados de capacidad.**

En la configuración 1 de prueba, donde el Angle bracket se encuentra cargado en tensión, todas las probetas fallaron de forma frágil debido a la extracción de los clavos que conectaban el angle bracket a los paneles CLT losa. Los valores calculados con los distintos códigos de diseño empleados subestimaron la capacidad de carga axial de los angulares Titan fijados con clavos Anker. La capacidad de carga estimada utilizando la NCh 1198 es el 62,81% y el 45,10% usando el procedimiento descrito en el EC 5 en comparación con el promedio de los valores experimentales.

Mientras que en el caso de la configuración de prueba donde el angle bracket se sometió a cargas de cizalle, se observó un comportamiento típico en la fluencia de los clavos y aplastamientos en la madera del panel CLT alrededor del conector, llegando en muchos casos a triturar la madera (Véase Figura 25). Además, la capacidad característica de la conexión siguiendo las disposiciones de los códigos de diseño estudiados subestiman los valores obtenidos en los ensayos en 1,32 veces siguiendo la NCh 1198, 1,30 veces utilizando el EC 5 y 1,12 veces utilizando las fórmulas propuestas por Uibel & Blaß.

Las predicciones analíticas de los modos de falla corresponden bien con los modos de fallas observados en la fase experimental. Las capacidades características calculadas en corte corresponden relativamente bien con los resultados experimentales. Además, se descubrió que las fórmulas propuestas por Uibel y Blaß son más precisas en comparación con las fórmulas dispuestas en la NCh 1198 (2014) y el EC 5 (2204).

La principal razón de estas diferencias se debe a que los códigos de diseño estudiados son muy conservadores y, además, fueron calibrados para uniones en madera tradicional y no CLT (excepto las fórmulas propuestas por Uibel & Blaß), por ende, deja de lado factores como la laminación cruzada, el pegado de bordes, etc.

Para mayor información respecto a la obtención de los valores característicos de diseño de las conexiones, revisar Anexo E.



**Figura 25. Formación de rotulas plásticas en los clavos y aplastamiento en la madera del panel CLT.**

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En esta tesis, se estudió a través de ensayos experimentales el comportamiento de un tipo de conexión típica para edificios de CLT que une los paneles muro-losa en los pisos superiores. El objetivo principal de este trabajo fue comprender con mayor precisión el desempeño estructural de la tipología de conexión seleccionada (angle bracket) evaluando sus propiedades mecánicas. Información muy valiosa a la hora de predecir el comportamiento sísmico de las estructuras de CLT.

De los ensayos cíclicos sobre los angle brackets cargados en tracción, se obtuvieron una rigidez elástica y plástica de 5,72 [kN/mm] y 0,95 [kN/mm] respectivamente, con una resistencia característica de 16,32 [kN].

Mientras que de los ensayos cíclicos donde los angle brackets se cargaron en corte, se obtuvieron una rigidez elástica y plástica de 3,64 [kN/mm] y 0,61 [kN/mm] respectivamente, con una capacidad característica de 24,42 [kN].

De la etapa experimental, se puede concluir que los angle bracket poseen una significativa capacidad y rigidez en ambas direcciones. Por lo tanto, su rigidez y capacidad axial (dirección débil) contribuyen de manera digna y no se deberían descuidar a la hora de evaluar los levantamientos de los muros producto de las fuerzas horizontales, ya sea sismo o viento.

Para el bracket cargado axialmente se observó un modo de falla frágil no deseado (extracción del clavo). Sin embargo, este es un problema que tiene solución logrando una mayor capacidad a la extracción de la unión que fija la losa, a través de tornillos auto perforantes que nos permitan lograr un modo de falla dúctil en los medios de unión que se fijan al muro.

En cizalle, dirección principal de transporte de carga del angle bracket, se observó un modo de falla dúctil. La falla consiste en la formación de rotulas plásticas en el elemento de fijación, clavos para nuestro caso, más el aplastamiento de la madera. En las estructuras de madera, el diseño de las conexiones siempre debe asegurar modos de fallas dúctiles.

A modo de sugerencias, con el objetivo de alcanzar siempre los modos de falla dúctil en los angle bracket de la unión muro-losa de CLT: utilizar siempre tornillos en la parte inferior debido a su mayor capacidad a la extracción y evitar la falla frágil de los clavos, seleccionar un número y el diámetro de los sujetadores (clavos y/o tornillos) en que la capacidad al corte de la unión no exceda la capacidad de la sección neta del acero y utilizar siempre clavos esbeltos.



Las comparaciones de los resultados experimentales con las ecuaciones analíticas de los códigos de diseño existente proporcionan estimaciones demasiado conservadoras de los valores de resistencia o capacidad característica de la conexión.

Una comparación de los resultados experimentales con las fórmulas propuestas por Uibel & Blaß para evaluar los valores de diseño de las conexiones en CLT, demostró que el modelo de diseño estima con exactitud razonable los valores de resistencia característica de las conexiones. Por lo tanto, para predecir la capacidad de corte y resistencia axial de los conectores en CLT, se necesita derivar más fórmulas para la resistencia de elementos de fijación tales como clavos, tornillos y otros tipos de clavijas, en combinación con paneles de distintos espesores y número de capas.

Como conclusión general, las conexiones en la construcción en madera, ya sea CLT o entramado ligero, desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento de la integridad de la estructura en la prestación de resistencia, rigidez y ductilidad. En consecuencia, requieren la atención detallada de los diseñadores.

Más investigaciones siguen siendo necesarias para caracterizar por completo el comportamiento de las diferentes tipologías de conexión para paneles CLT, con el objetivo de proporcionar información necesaria a los profesionales involucrados en la práctica del diseño e introducir al país un nuevo sistema constructivo. A modo de comentario, mencionar nuevamente la necesidad de contar con dispositivos que nos permitan regular la velocidad de carga en este tipo de ensayos.

El desarrollo de futuras líneas de trabajo es fundamental para avanzar en el conocimiento de las uniones en paneles de CLT. Invitar a la investigación de todas las formas de conexión en una edificación con CLT como las uniones entre muros, ya sean paralelos o perpendiculares entre sí, y entre los paneles losa. Es recomendable que luego de los ensayos cíclicos de las conexiones continuar con pruebas a conjuntos estructurales a escala 1:1.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

Dujic, B., Aicher, S., & Zarnic, R. (2006). *Racking behavior of light prefabricated cross-laminated massive timber wall diaphragms subjected to horizontal actions*. Otto-Graf-Journal Vol. 17, 2006.

EN 12512 (2002). Estructura de madera – Métodos de ensayo – Ensayo cíclico de uniones realizadas con conectores mecánicos. AENOR, España.

EN 1995-1-1 (2004). Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for building. CEN, Brussels, Belgium.

EN 26891 (1991). Estructura de madera – Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos – Principios generales para la determinación de características de resistencia y deslizamiento. AENOR, España.

ETA-11/0496 (2012). Angle Bracket for timber-to-timber or timber-to-concrete or Steel connections. *European Organisation for Technical Approvals (EOTA)*.

FPInnovations (2011). *CLT Handbook: Cross-laminated timber*. Edited by Sylvain Gagnon and Ciprian Pirvu. Library and Archives Canada Cataloguing in Publication, Quebec City, Canada.

FPInnovations (2013). *CLT Handbook: Cross-laminated timber. US Edition*. Edited by Erol Karacabeyli and Brab Douglas. Library and Archives Canada Cataloguing in Publication, Quebec City, Canada.

Gavric, I., Fragiaco, M., & Ceccotti, A. (2012). *Strength and deformation characteristics of typical X-LAM connections*. 12<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand.

Gavric, I., Fragiaco, M., & Ceccotti, A. (2014b). *Cyclic behavior of typical metal connector for cross-laminated (CLT) structures*. Mater Struct. Doi: 10.1617/s11527-014-0278-7 (published online).

Gavric I (2013). *Seismic behaviour of cross-laminated timber building*, Ph.D. Thesis, University of Trieste, Italy.

Instituto Nacional de Normalización (INN). NCh 176. Madera – Parte 2: Determinación de la densidad.

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

Instituto Nacional de Normalización (INN). NCh 2148. Madera laminada encolada estructural – Requisitos e inspección.

Popovski M., Karacabeyly E. (2011). *Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber Structures*.

Rothoblaas. <http://http://www.rothoblaas.com>

## ANEXO A: RESISTENCIA A CIZALLE A TRAVES DEL ADHESIVO.

El objetivo principal es verificar los requerimientos mínimos de resistencia a cizalle en la línea de encolado del adhesivo a través de ensayos mecánicos a probetas. Para lograr esto, se realizaron ensayos a un número determinados de probetas, según norma NCh 2148 Of. 89.

### A1. Método de ensayo.

El método se basa en someter a cizalle el plano de encolado con una carga en dirección paralela a las fibras de la madera con un incremento gradual de esta, hasta llegar al punto de falla de la probeta y registrando a cada instante la carga y el desplazamiento producido en la probeta. Ver figura A1.

La máquina de ensayo debe ser capaz de medir las cargas de rotura con una precisión de  $\pm 5$  N y aplicarlas con una velocidad de carga de  $0,6$  mm/min  $\pm 25\%$ . Para lograr esto se utilizó el equipo Instron 4468.

Cada probeta se debe marcar de modo que se pueda identificar. En la Figura A1 se presenta la forma y dimensiones de la probeta a usar.

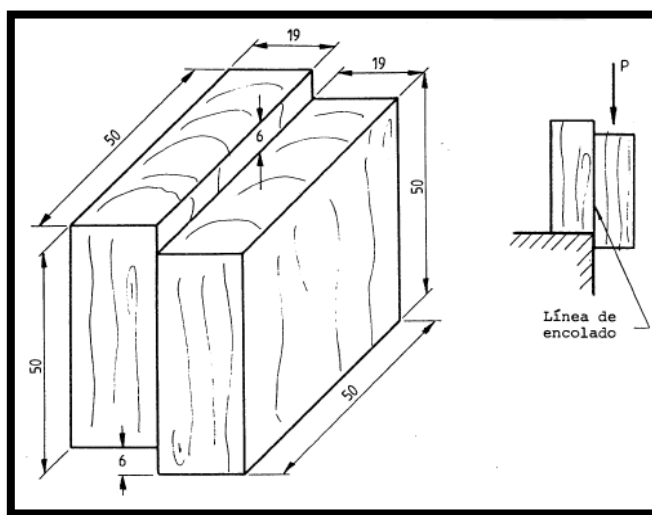


Figura A1. Descripción de la probeta y aplicación de la carga (según NCh 2148 of. 89).

## A2. Fabricación de probetas.

La fabricación de las probetas (ver Figura A2) se realizó en las instalaciones del laboratorio de desarrollo investigación y tecnología de la madera (LADITEMA) de la Universidad del Bío Bío, se consideraron todas las recomendaciones entregadas por el fabricante del adhesivo y los requisitos de la norma Nch 2148 of. 89, con respecto al curado y prensado de las piezas (0,7 MPa como mínimo). Obteniendo un tiempo y presión de prensado de 3,0 hrs y 1 MPa respectivamente y posteriormente 7 días de maduración antes de ensayar.



**Figura A2. Fabricación de las probetas.**

## A3. Análisis y discusión de Resultados.

Los ensayos de resistencia de la línea de cola se realizaron en el laboratorio de adhesivos del centro de biomateriales y nanotecnología (CBN) de la Universidad del Bío Bío. Donde las probetas son montadas sobre el equipo *Instrom 4468* para aplicar la carga sobre la probeta tal como lo indica la norma Nch 2148 Of.89. Ver figura A3.

El número de probetas ensayados fueron 10, lo cual cumple con la exigencia de la norma (mayor igual a 6) y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla A1.



**Figura A3. Probeta montada sobre el dispositivo Instron.**

**Tabla A1. Resultados de ensayos de cizalle a través de la línea de cola.**

N° de probeta	Área (mm <sup>2</sup> )	Q (KN)	T (MPa)	Área de falla (%)
1	2212,82	24,76	11,19	100
2	2230,85	25,52	11,44	100
3	2225,97	27,11	12,18	100
4	2241,78	26,70	11,91	90
5	2225,37	23,33	10,48	80
6	2180,91	28,27	12,96	100
7	2221,91	23,60	10,62	90
8	2210,34	28,67	12,97	100
9	2217,54	13,34	6,02	100
10	2227,85	26,86	12,06	75
Promedio		24,82	11,18	93,5

Se obtuvieron como resultado el promedio de los valores de resistencia al cizalle y el promedio de los porcentajes de falla de madera en el área cizallada (ver Figura A4), 11.18 MPa y 93.5 % respectivamente, los cuales cumplen con los requisitos establecidos en la norma NCh 2148 Of. 89 ( $\geq 6,7$  MPa y  $\geq 70\%$ ) para evaluar la calidad, efectividad y eficacia del adhesivo. Dicho esto, el adhesivo se encuentra en condiciones para la fabricación de los paneles de madera contra laminada (CLT).



**Figura A 4. Falla de la madera en el área cizallada para cada una de las probetas ensayadas.**



## ANEXO B. FABRICACION DE LAS PROBETAS.

La fabricación de las probetas tanto para ensayos a tracción como el ensayo a corte fueron realizados en las dependencias de la Universidad del Bío-Bío campus Concepción, la fabricación de las probetas de CLT fueron realizadas en las instalaciones del laboratorio de diseño y tecnología de la madera (LADITEMA).

### B1. Secuencia de fabricación.

Todas las piezas de madera se calibraron a una misma esquadría, 35x90 mm. Terminada esta fase, se aplicó el encolado de borde y el prensado cada 5 piezas, formando capas de 35x 450 mm. (véase Figura B1).



**Figura B 1. Calibración de la esquadría, encolado de borde y prensado.**



Una vez formadas todas las capas de los paneles, se vuelven a acondicionar y se obtienen capas de 30x450 mm con el objetivo de obtener superficies limpias de imperfecciones para el posterior pegado de los paneles CLT. Posteriormente se realiza una inspección visual para evitar cualquier tipo de imperfección y se seleccionan las caras a encolar con el adhesivo previamente testeado.

La aplicación del adhesivo se realizó con espátulas, creando una película completamente homogénea y la colocación de las láminas ortogonales que en su conjunto forman el panel, se realizó a una velocidad tal de cumplir con las exigencias del fabricante del adhesivo. Ver Figura B2.



**Figura B 2. Inspección y aplicación del adhesivo.**

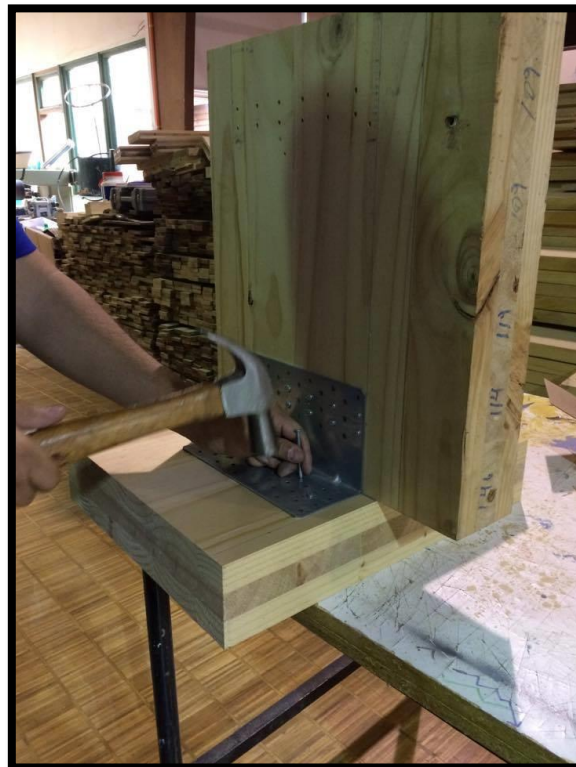
El prensado de los paneles se realizó en el marco de carga de las instalaciones del DITEMA, posterior al prensado se procede a formatear los paneles y se obtienen las siguientes dimensiones de probetas: 90x420x48o y 90x390x48, dimensiones en mm. Ver Figura B3.

Una vez realizado el formateo de las probetas, se acondicionaron en la cámara hidro térmica del CITEC-UBB, en la cual se mantuvieron a una temperatura y humedad constante tal y como se indica en la norma de referencia EN 26891.

Posteriormente, las configuraciones de ensayos son preparadas de forma manual. Ver Figura B4.



**Figura B 3. Probeta de CLT.**



**Figura B 4. Preparación de probeta de ensayo.**

## ANEXO C. PROTOCOLO DE CARGA.

### C1. Ensayo monotónico.

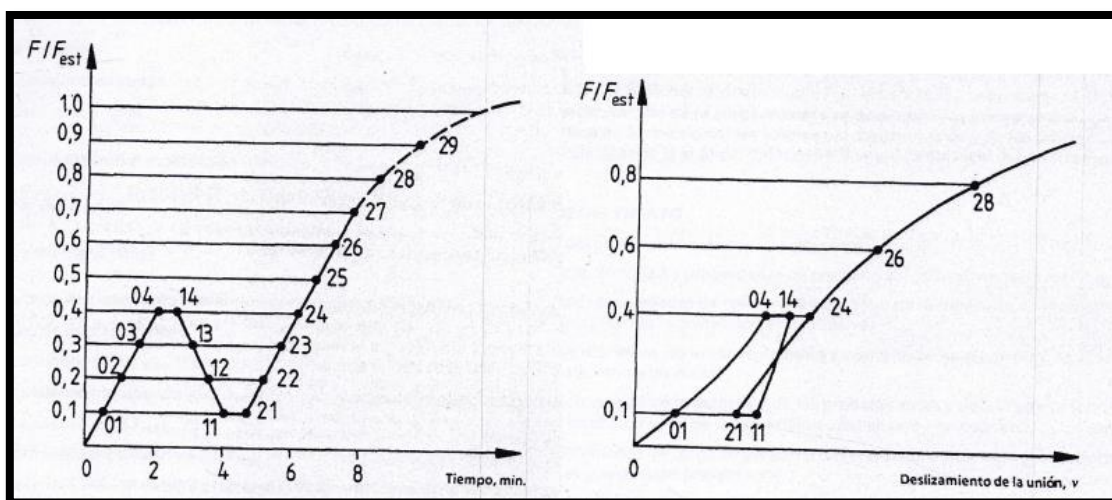
Se siguió un procedimiento estándar que establece los principios generales para la determinación de las características de resistencia y deslizamiento de uniones realizadas con elementos de fijación mecánica de acuerdo a la norma EN 26891, cuyo procedimiento de carga consiste en la determinación sobre la base de la experiencia, cálculo o ensayos preliminares de la carga máxima estimada ( $F_{est}$ ). Luego la carga deberá aplicarse hasta  $0.4F_{est}$ , y se mantendrá durante 30 s. Después, se reducirá a  $0.1F_{est}$  y se mantendrá durante 30 s. A continuación, se incrementa hasta que se alcance la carga final o un deslizamiento de 15 mm. (véase Figura B1)

Por debajo de  $0.7F_{est}$  deberá emplearse un régimen constante de carga o de deslizamiento que corresponda a  $0.2F_{est}$  por minuto  $\pm 25\%$ . Por encima de  $0.7F_{est}$  deberá emplearse una velocidad constante de deslizamiento, ajustada de manera que se logre la carga final o un deslizamiento de 15 mm en un tiempo de ensayo adicional de 3 a 5 minutos (tiempo total del ensayo de 10 a 15 min.).

El ensayo puede detenerse cuando se alcance la carga final, o cuando el deslizamiento sea de 15 mm. Para determinados ensayos el ciclo de carga previa a  $0.4F_{est}$  puede omitirse con un ajuste que corresponda al tiempo total del ensayo.

Los resultados de las pruebas experimentales se evaluaron en términos de carga y deslizamiento, siendo el deslizamiento plástico ( $v_y$ ) el parámetro de estudio principal para la calibración de los ensayos cíclicos. Evaluación de propiedades mecánicas:

- $F_{est}$  representa la carga máxima estimada, en N.
- $F_{max}$  denota la carga máxima aplicada, en N.
- $v_y$  representa el deslizamiento plástico, en mm.



a)

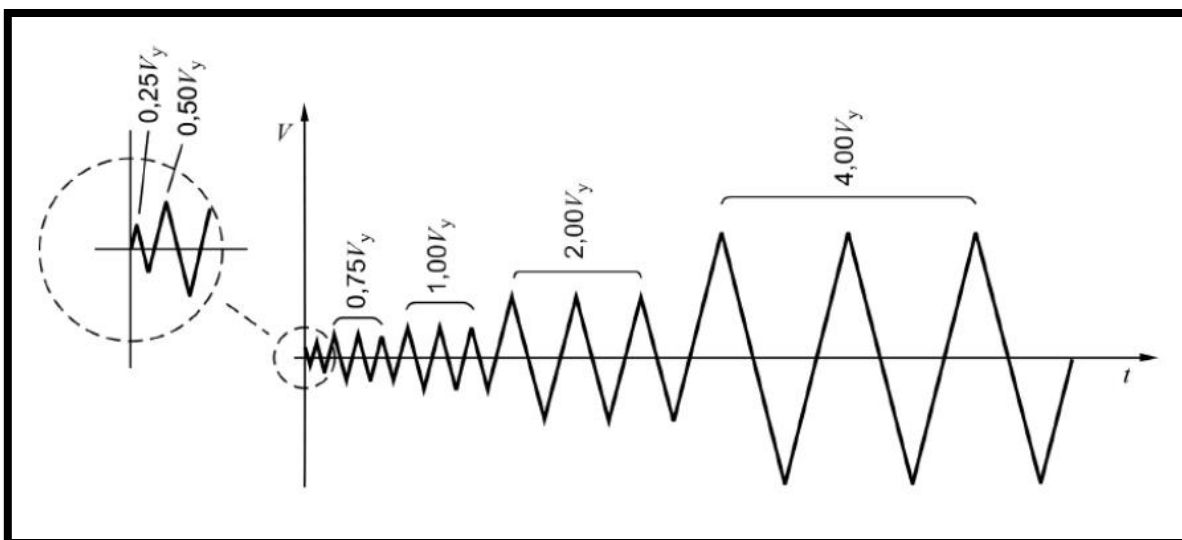
b)

**Figura C 5. a) procedimiento de carga; b) curva teórica de carga/deslizamiento, según EN 26891.**

## C2. Ensayo Cíclico.

Para la realización de los ensayos, se siguió el procedimiento de carga cuasi estática prescrito en la norma EN 12512 (2002) para uniones realizadas con conectores mecánicos para obtener información relativa a su ductilidad, resistencia y rigidez bajo cargas cíclicas. El ensayo debe realizarse con una velocidad de desplazamiento constante comprendida entre 0.02 mm/s y 0.2 mm/s. Además, las probetas tienen que ser acondicionadas en condiciones controladas a una temperatura de  $20\text{ °C} \pm 2$  y una humedad relativa de  $65\% \pm 5$ .

Todos los ensayos se realizaron mediante un procedimiento cíclico inverso (ver Figura B2) con valores predefinidos que varían en función de la configuración, dependiendo de los valores experimentales obtenidos de las pruebas monotónicas. Sin embargo, las pruebas en dirección de tensión se sometieron a una modificación no inversa del procedimiento de la norma EN 12512 (2002) debido al movimiento restringido en la dirección de la compresión.



**Figura C 6. Protocolo de carga para ensayos cíclicos, según EN 12512, 2001.**

Carga cíclica: carga alternada de compresión y tracción.

Carga máxima: carga máxima  $F_{m\acute{a}x}$  alcanzada durante el ensayo, véase Figura B 3.

Carga última: carga en la unión correspondiente a:

- la rotura; o
- el 80% de la carga máxima con un deslizamiento de la unión menor a 30 mm; o
- un deslizamiento de la unión de 30 mm (cualquiera de ellos que se alcance antes en el ensayo), véase Figura B 3.

Carga plástica: carga correspondiente al inicio del tramo plástico. Cuando la curva carga/deslizamiento presenta dos partes lineales bien definidas, el límite plástico se determina por intersección entre estas dos líneas (véase Figura B 4a). Cuando la curva de carga/deslizamiento no presenta estas dos partes lineales bien definidas, el límite plástico se determina por intersección de las dos líneas siguientes: la primera línea se determinará por la recta entre el punto de la curva de carga/deslizamiento correspondiente a  $0,1F_{m\acute{a}x}$  y el punto de la curva de carga/deslizamiento correspondiente a  $0,4F_{m\acute{a}x}$ ; la segunda línea es la tangente con una pendiente de  $1/6$  de la primera línea (véase Figura B 4b).

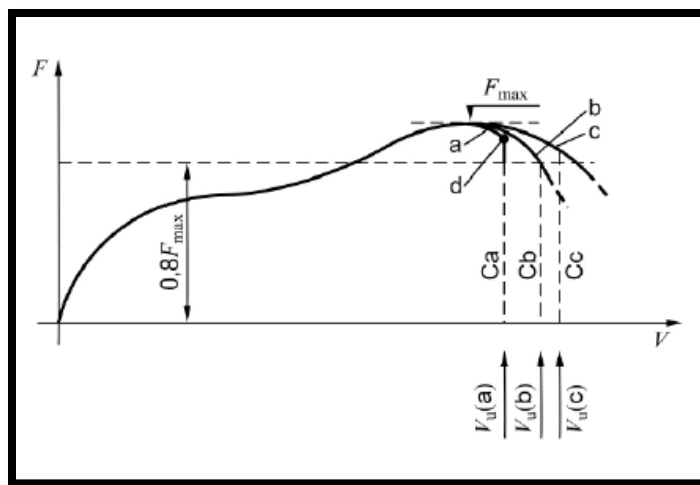


Figura C 7. Definición de los límites últimos, según EN 12512 (2001).

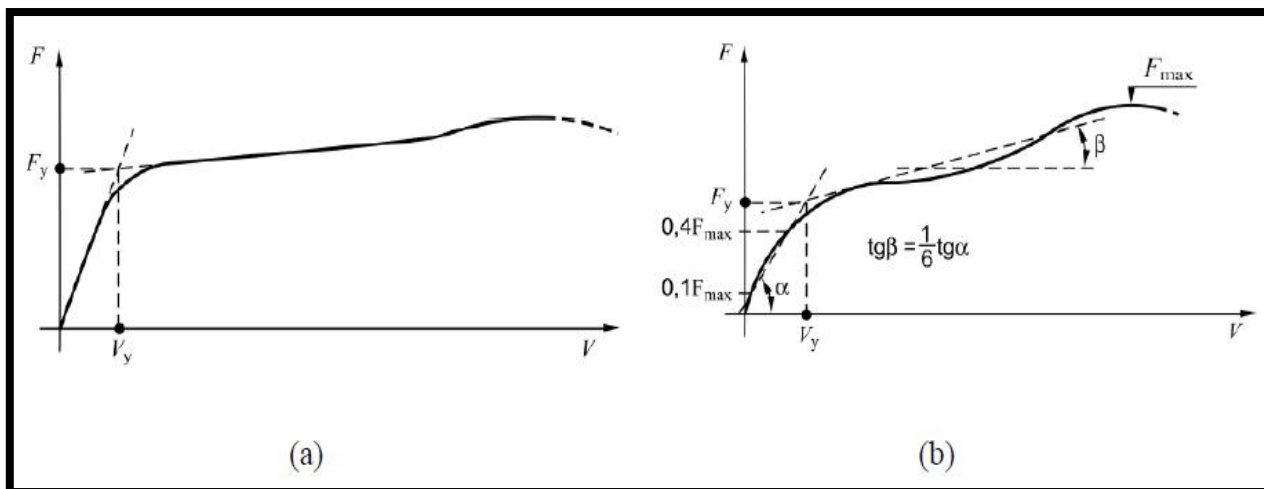


Figura C 8. a) Definición de los valores plásticos para una curva de carga/deslizamiento con dos tramos lineales bien definidos; b) definición de los valores plásticos para una curva de carga/deslizamiento sin tramos lineales bien definidos, Según EN 12512 (2001).

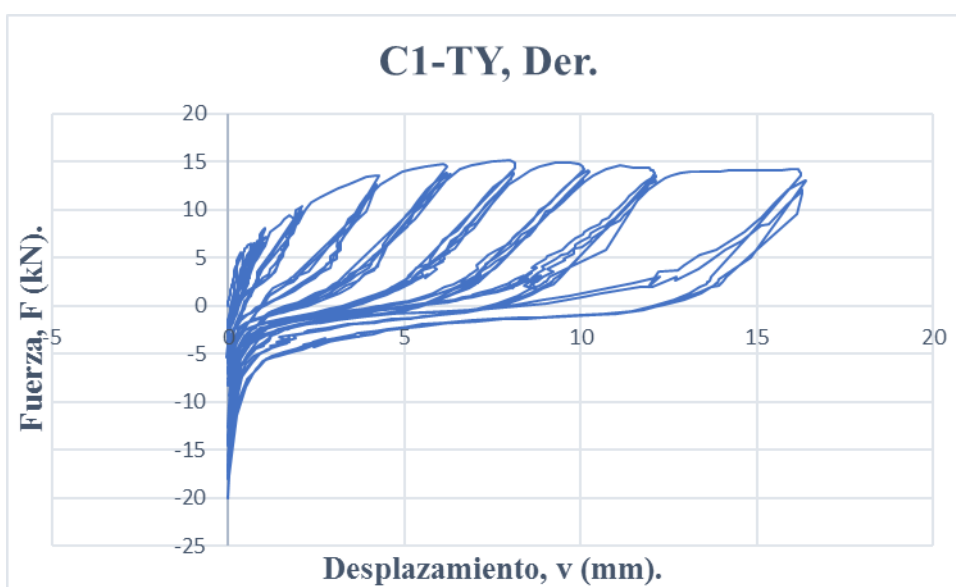
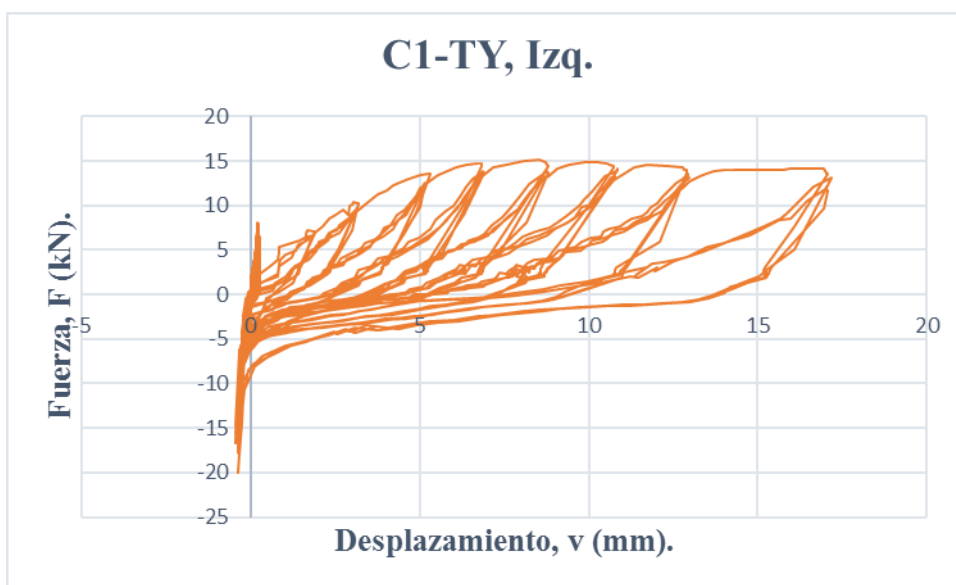
## ANEXO D. Resultados.

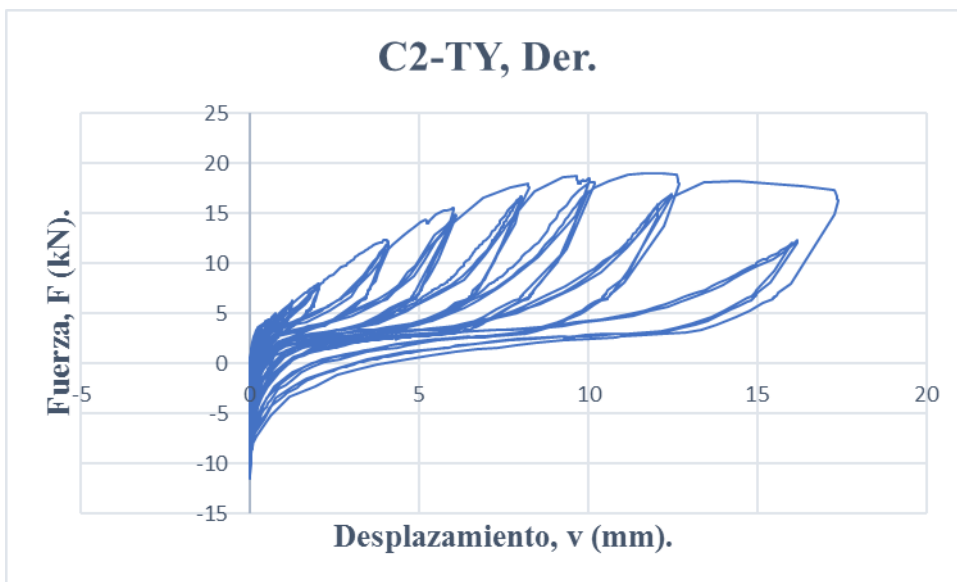
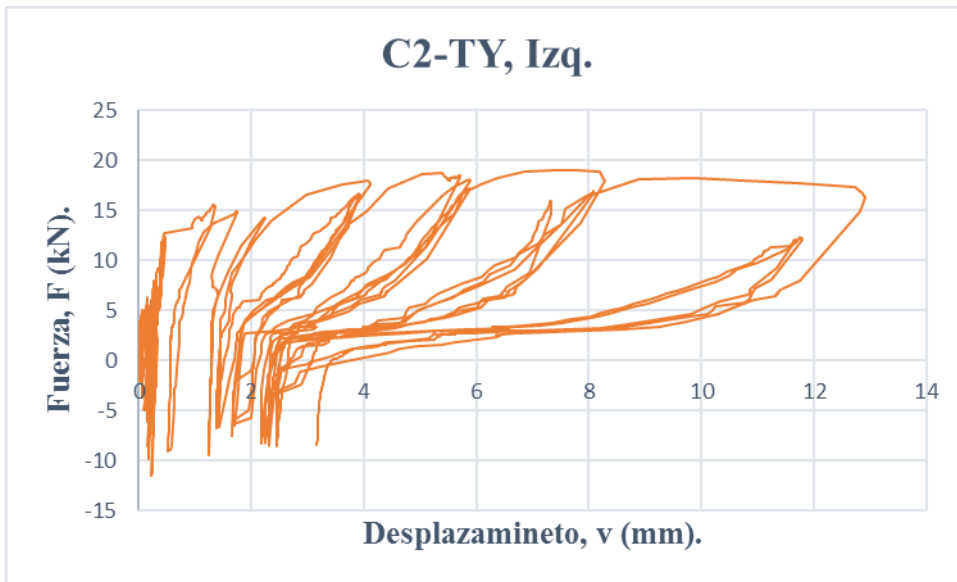
### D1. Codificación de las probetas.

C1-TY, Izq.=Cíclico, repetición 1 – Dirección Y, tracción o tensión – Bracket Izquierdo.

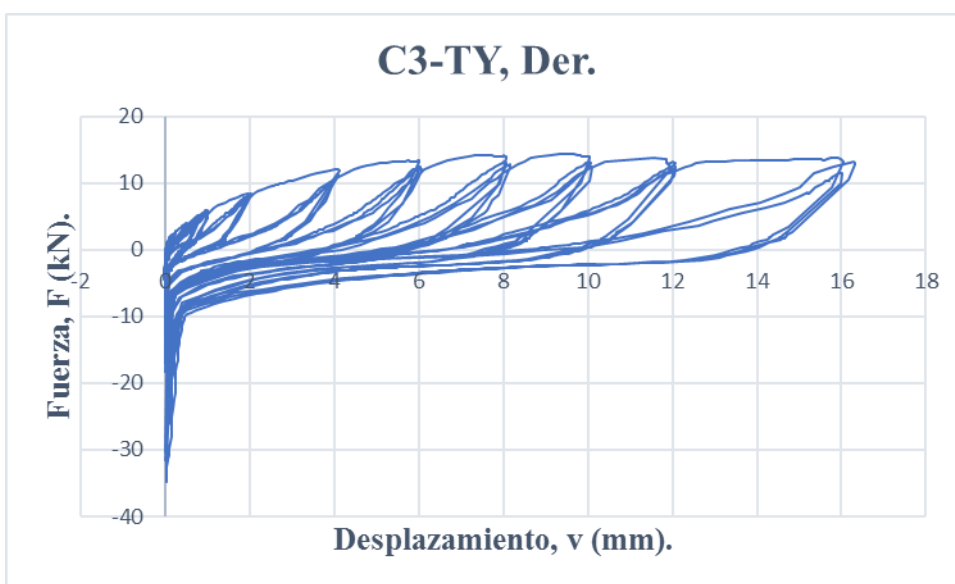
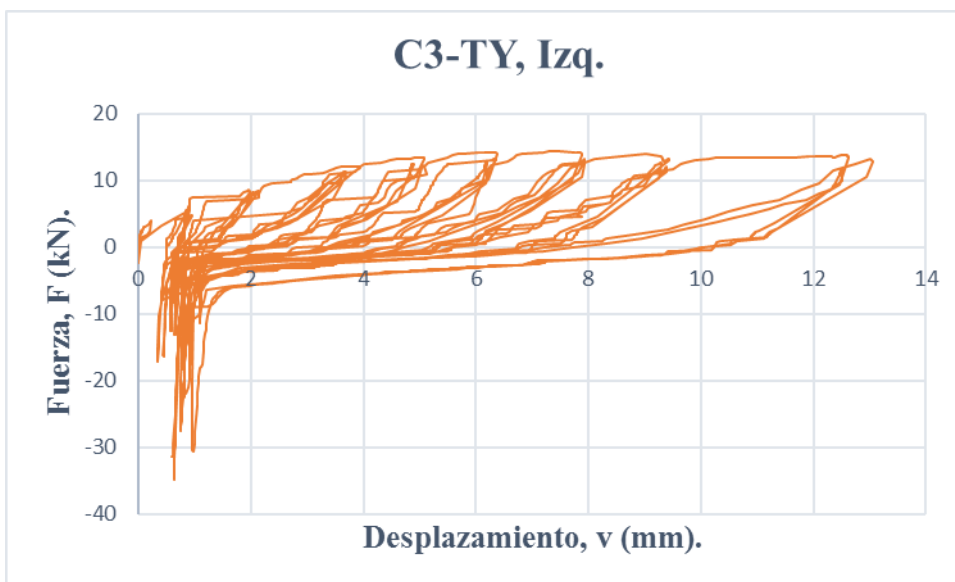
C3-TX, 4=Cíclico, repetición 3 – Dirección X, Corte o cizalle – Bracket 4.

### D2. Gráficas y tablas individuales



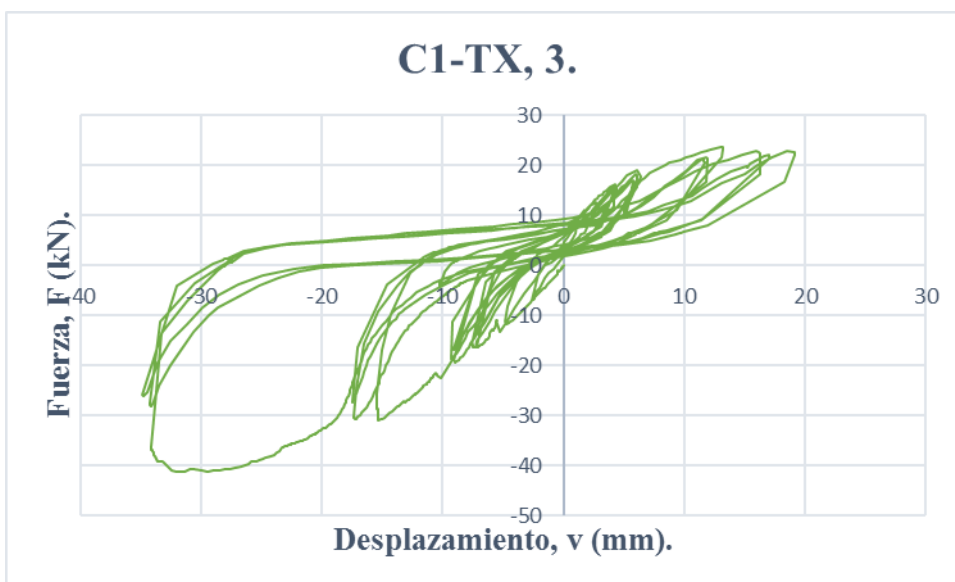
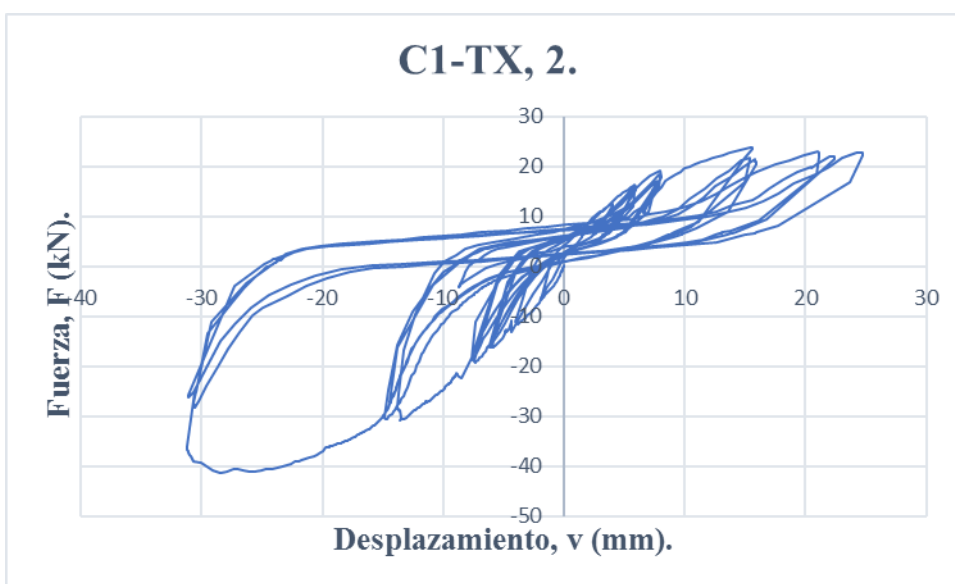
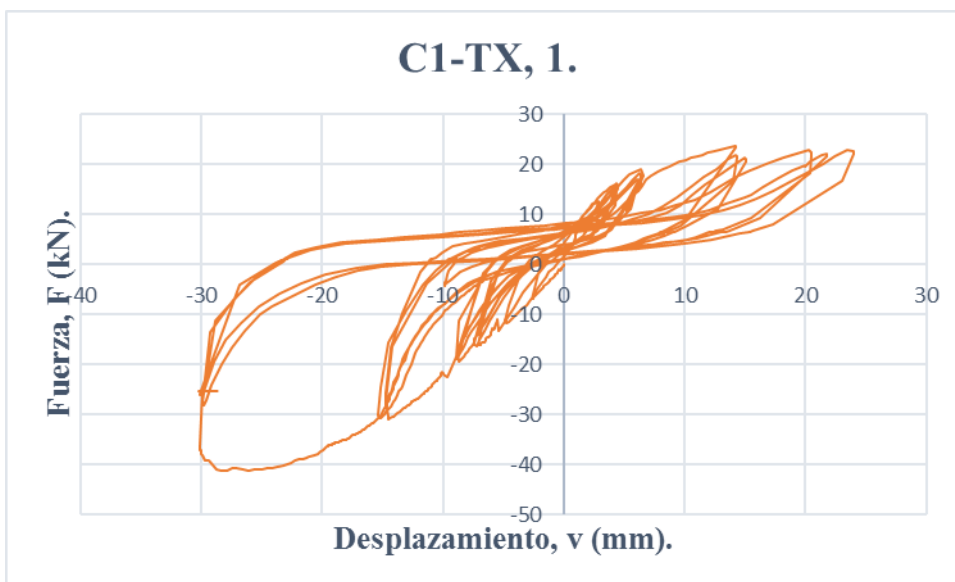


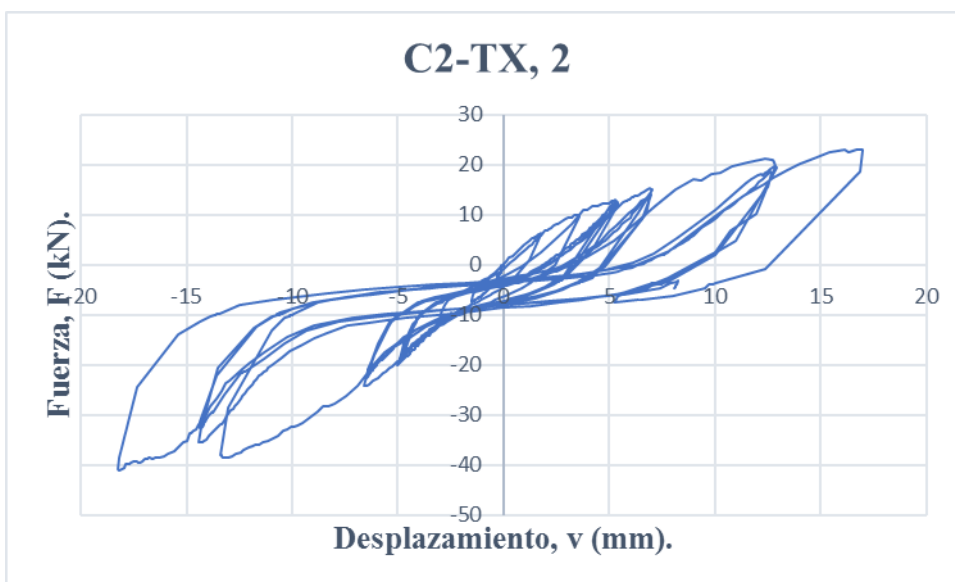
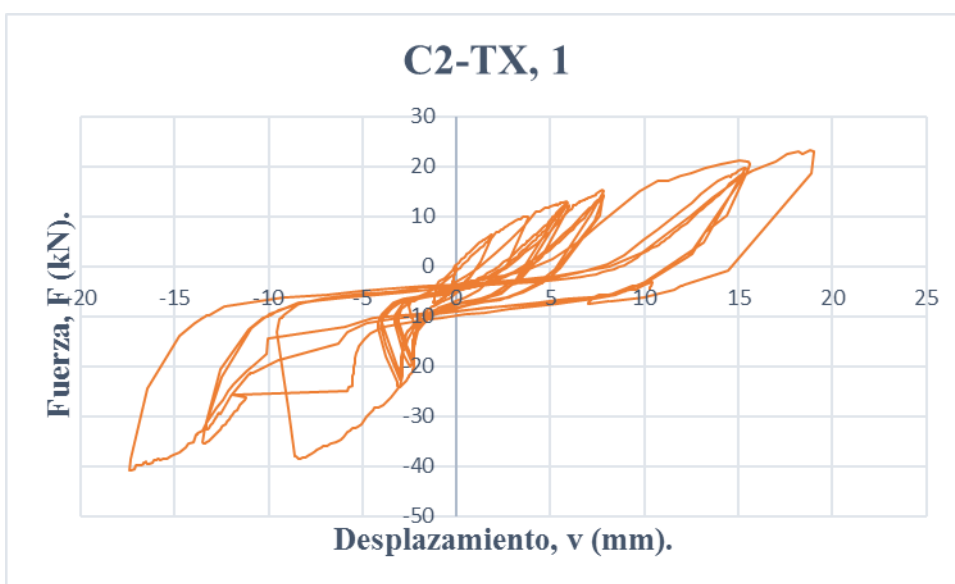
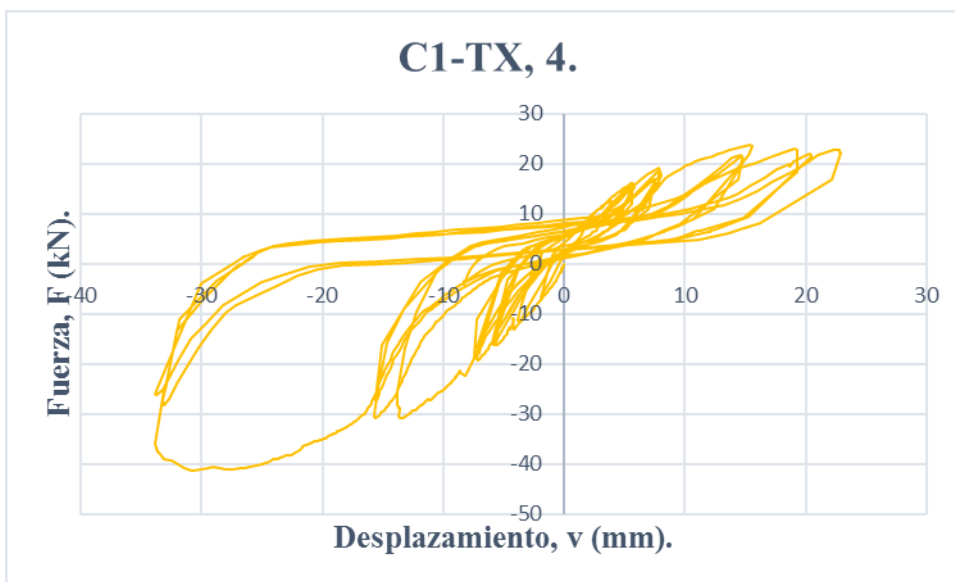


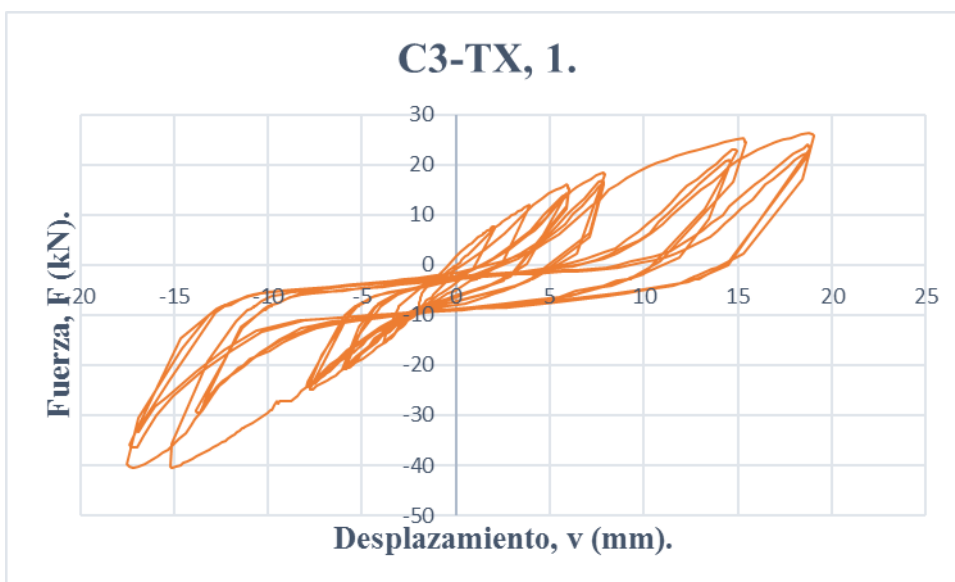
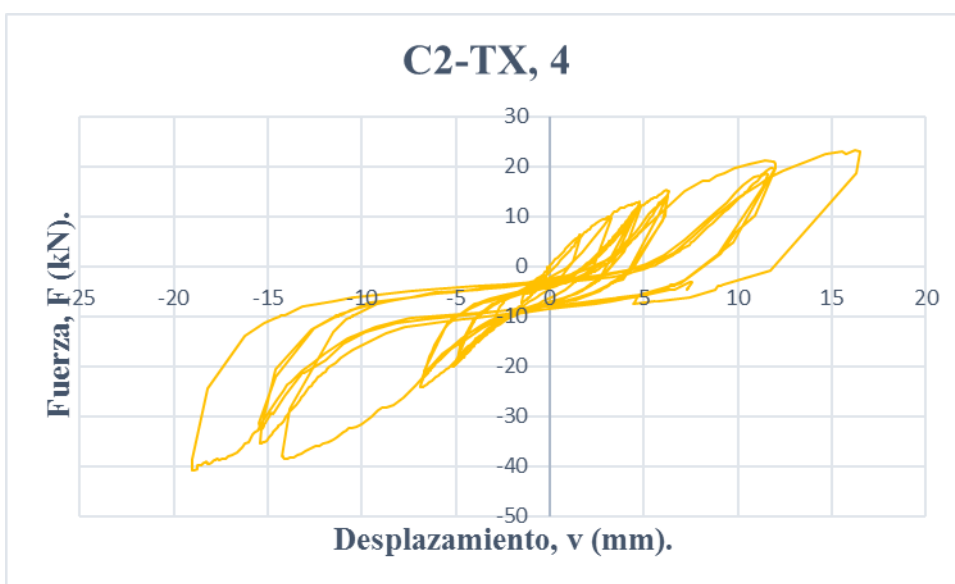
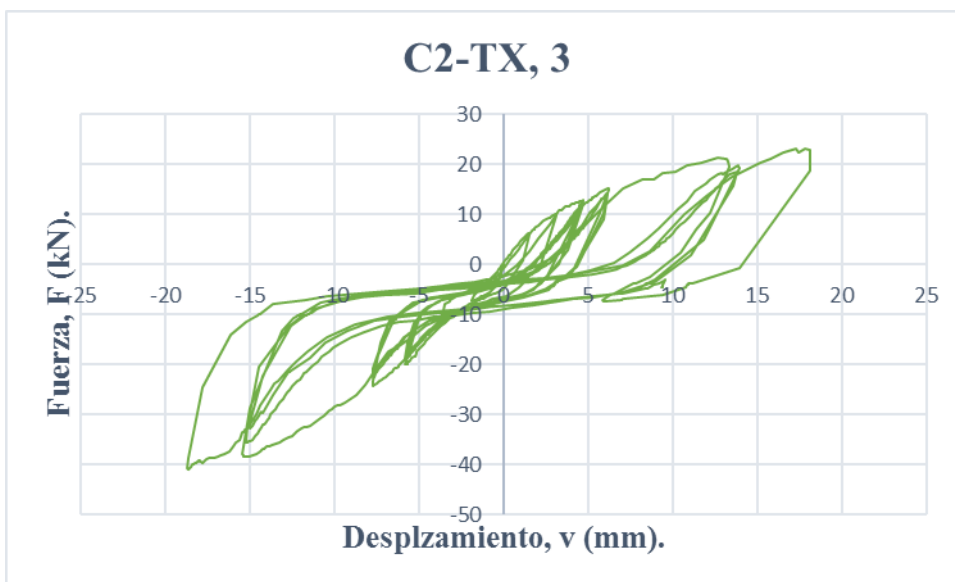


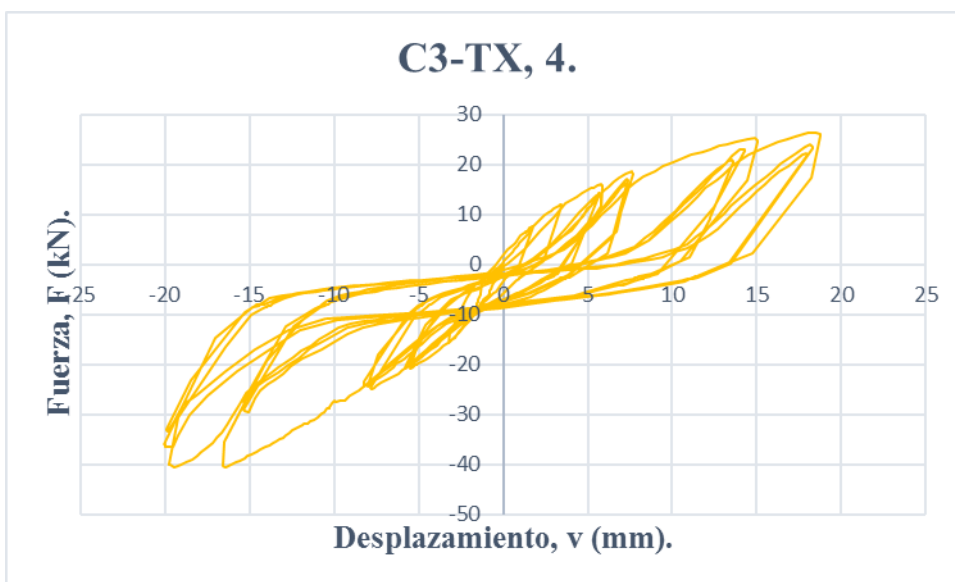
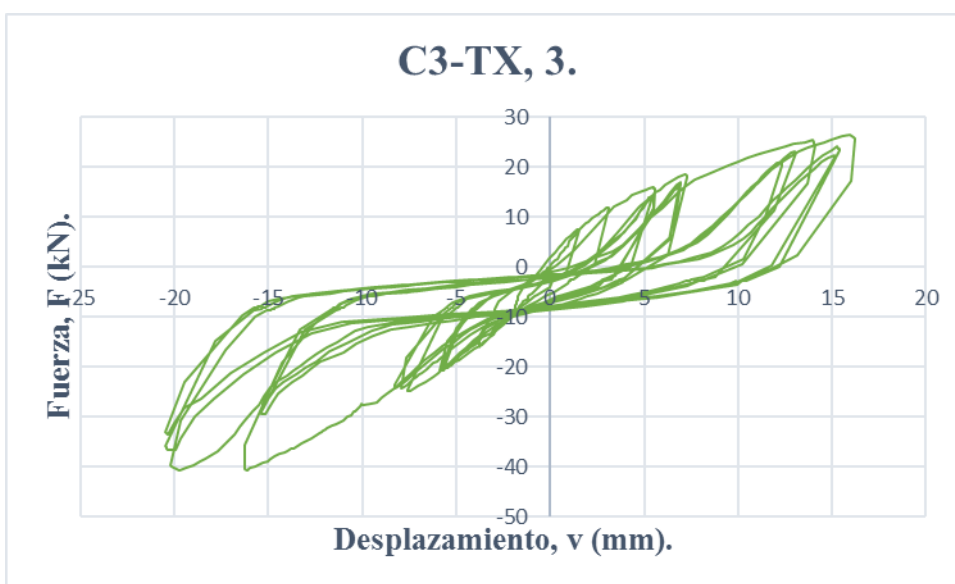
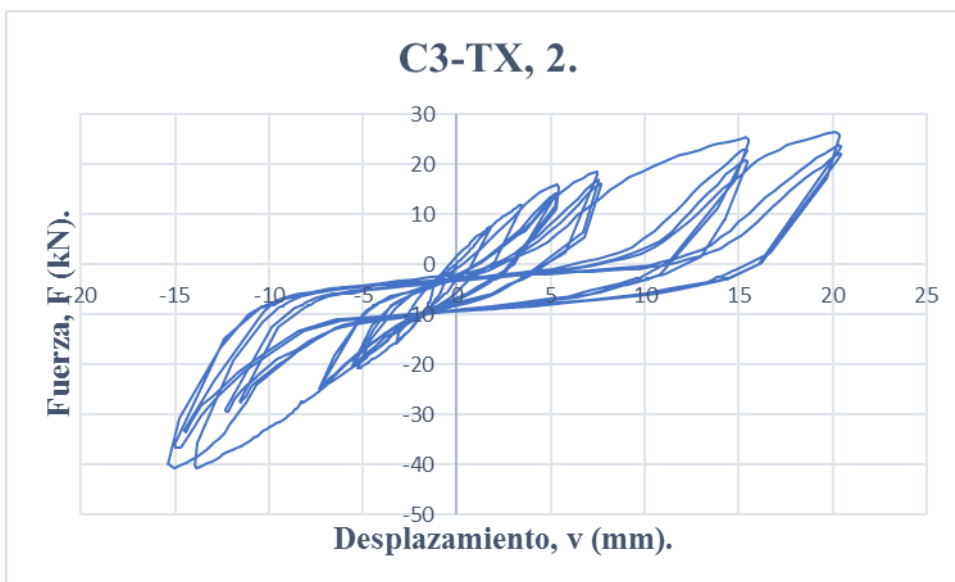
**Tabla D1. Propiedades mecánicas por angle bracket, ensayo cíclico en tracción.**

Propiedades mecánicas.	C1-TY		C2-TY		C3-TY		Promedio.	Desviación estándar.
	Izq.	Der.	Izq.	Der.	Izq.	Der.		
$K_{el}$ [kN/mm]	7,98	7,71	*	3,15	4,92	4,86	16,32	2,06
$K_{pl}$ [kN/mm]	1,33	1,28	*	0,53	0,82	0,81	0,95	0,34
$F_y$ [kN]	7,80	9,70	*	15,61	9,67	9,19	10,40	3,02
$v_y$ [mm]	0,82	1,12	*	4,41	1,79	1,69	1,96	1,42
$F_{max}$ [kN]	15,16	15,16	*	19,03	14,76	14,76	16,32	2,11
$v_{max}$ [mm]	8,54	8,00	*	12,19	7,39	9,5	9,12	1,88
$F_u$ [kN]	13,10	13,10	*	16,33	12,90	12,90	13,67	1,49
$v_u$ [mm]	17,17	16,40	*	17,79	13,06	16,33	16,05	1,73
D	20,99	14,62	*	3,92	7,30	9,66	11,30	6,67









**Tabla D6. Propiedades mecánicas por angle bracket, ensayo cíclico en corte.**

	<b>K<sub>el</sub></b> <b>(kN/mm)</b>	<b>K<sub>pl</sub></b> <b>(kN/mm)</b>	<b>F<sub>y</sub></b> <b>(kN)</b>	<b>V<sub>y</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>V<sub>u</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>D</b>
<b>C1-TX,1</b>	4,99	0,83	25,78	5,29	14,09	2,66
<b>C1-TX,2</b>	3,90	0,65	25,61	6,50	15,35	2,36
<b>C1-TX,3</b>	5,57	0,93	25,84	4,80	12,95	2,70
<b>C1-TX,4</b>	4,24	0,71	25,66	6,05	15,37	2,54
<b>C2-TX,1</b>	2,61	0,43	17,48	6,36	18,80	2,95
<b>C2-TX,2</b>	2,91	0,48	18,16	6,03	16,71	2,77
<b>C2-TX,3</b>	3,29	0,55	17,14	5,00	17,86	3,57
<b>C2-TX,4</b>	3,26	0,54	17,97	5,39	16,22	3,01
<b>C3-TX,1</b>	2,78	0,46	20,57	6,77	18,80	2,78
<b>C3-TX,2</b>	3,23	0,54	19,33	5,47	20,14	3,68
<b>C3-TX,3</b>	3,60	0,60	19,27	4,87	15,95	3,28
<b>C3-TX,4</b>	3,31	0,55	19,53	5,40	18,49	3,43
<b>Prom.</b>	3,64	0,61	21,03	5,66	16,73	2,98
<b>Desv. Est.</b>	0,86	0,14	3,44	0,63	2,05	0,41

## ANEXO E. Cálculo de valores característicos utilizando códigos de diseño existentes.

### E1. NCh 1198.

E1.1. Resistencia a extracción lateral en cizalle simple de una pieza de madera conectada con clavos Anker 4x60 mm. a una placa de acero (Titan TTN240).

Datos:

$\rho_0 = 450 \text{ kg/m}^3$  Densidad anhidra del pino radiata.

$F_u = 460 \text{ MPa}$  Tensión de ruptura acero S355.

$e_{TTN240} = 3 \text{ mm}$  Espesor del angle bracket.

$e_{CLT} = 900 \text{ mm}$  Espesor del panel CLT.

$D = 4 \text{ mm}$  Diámetro del clavo.

$l = 60 \text{ mm}$  Largo del clavo.

$n_v = 12$  Número de clavos que fijan el bracket al muro de CLT.

$n_H = 12$  Número de clavos que fijan el bracket a la losa de CLT.

- Resistencia de aplastamiento del vástago en el madero principal.

$$R_{ap,c} = 115 \times (\rho_0/1000)^{1,84} = 26,5 \text{ [MPa]}$$

- Resistencia nominal de aplastamiento en las paredes de los agujeros del angle bracket.

$$R_n = \min \begin{cases} 2,4 \times F_u \\ 3,0 \times F_u \\ 2,0 \times F_u \end{cases}$$

- Resistencia de aplastamiento en las paredes de los agujeros del angle bracket, considerando un factor de reducción 1,6 con el propósito de adecuarlo al criterio de diseño en madera.

$$R_{ap,l} = \frac{R_n}{1,6} = 575 \text{ [MPa]}$$

- Longitud de apoyo del medio de unión en la pieza de CLT.

$$l_c = l - e_{TTN240} = 57 \text{ [mm]}$$

- Longitud de apoyo en la placa metálica.

$$l_l = e_{TTN240} = 3 \text{ [mm]}$$

- Factor de ajuste según Tabla 36.

$$FA = k_d = 2,2 \quad \text{Cuando } D \leq 4,3 \text{ [mm]}$$

- Relación de resistencia de aplastamiento y longitudes de apoyo.

$$R_e = \frac{R_{ap,c}}{R_{ap,l}} = 0,046 \quad R_t = \frac{l_c}{l_l} = 19$$

- Tensión de fluencia en flexión del acero del medio de unión.

$$F_{ff} = 896 - 58 \times D = 664 \text{ [MPa]}$$

- Capacidad admisible de extracción lateral.

Modo Ic. Aplastamiento en la madera.

$$P_{el} = \frac{D \times l_c \times R_{ap,c}}{FA} = 2742,34 \text{ [N]}$$

Modo Ii. Aplastamiento en la placa de acero.

$$P_{el} = \frac{D \times l_l \times R_{ap,l}}{FA} = 3136,36 \text{ [N]}$$

Modo II. Giro del conector sin ceder más aplastamientos localizados de los miembros.

$$k_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2 \times R_e^2 \times (1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 \times R_e^3 - R_e \times (1 + R_t)}}{1 + R_e} = 0,365$$

$$P_{el} = (k_1 \times D \times l_l \times R_{ap,l}) \frac{1}{FA} = 1143,93 \text{ [N]}$$

Modo IIIc. Rotula plástica del conector más aplastamiento en la madera del panel CLT.

$$k_2 = -1 + \sqrt{2 \times (1 + R_e) + \frac{2 \times F_{ff} \times (1 + 2 \times R_e) \times D^2}{3 \times R_{ap,c} \times l_l^2}} = 0,5$$

$$P_{el} = \frac{k_2 \times D \times l_c \times R_{ap,c}}{(1 + 2 \times R_e) \times FA} = 1198,24 \text{ [N]}$$



Modo III<sub>l</sub>. Rotula plástica del conector más aplastamiento en la placa de acero.

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2 \times (1 + R_e)}{R_e} + \frac{2 \times F_{ff} \times (2 + R_e) \times D^2}{3 \times R_{ap,c} \times l_l^2}} = 9,3$$

$$P_{el} = \frac{k_3 \times D \times l_l \times R_{ap,c}}{(2 + R_e) \times FA} = 656,81 [N]$$

Modo IV. Dos rotulas plásticas en el conector con aplastamientos localizados en ambos miembros.

$$P_{el} = (D^2 / FA) \times \sqrt{\frac{2 \times R_{ap,c} \times F_{ff}}{3 \times (1 + R_e)}} = 769,61 [N]$$

$$P_{el,adm} = \min \begin{cases} \text{Modo } I_c = 2742,34 [N] \\ \text{Modo } I_l = 3136,36 [N] \\ \text{Modo } II = 1143,93 [N] \\ \text{Modo } III_c = 1198,25 [N] \\ \text{Modo } III_l = 656,81 [N] \\ \text{Modo } IV = 769,61 [N] \end{cases}$$

$$P_{el,adm} = 656,81 [N]$$

- Capacidad característica de extracción lateral.

$$P_{el,k} = 2,5 \times P_{el,adm} = 1642,01 [N]$$

$$n_v \times P_{el,k} = 19,70 [kN]$$

$$n_H \times P_{el,k} = 19,70 [kN]$$

E1.2. Resistencia a extracción directa de una pieza de madera conectada con clavos Anker 4x60 mm. a una placa de acero (Titan TTN240).

Datos:

$$D = 4 \text{ mm} \quad \text{Diámetro del clavo.}$$

$$p = 57 \text{ mm} \quad \text{Penetración del clavo en la pieza de madera.}$$

$$\rho_{o,k} = 370 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Densidad anhidra característica calculada.}$$

$$n_H = 12 \quad \text{Número de clavos que fijan el bracket a la losa de CLT.}$$

- Capacidad admisible de extracción directa.

$$P_{ed,ad} = 9 \times \rho_{o,k}^{5/2} \times D^{3/2} \times p \times 10^{-3} = 341,75 \text{ N}$$

- Capacidad característica de extracción directa.

$$P_{ed,k} = 2,5 \times P_{ed,ad} = 854,38 \text{ N}$$

$$n_H \times P_{ed,k} = 10,25 \text{ kN}$$

## E2. EC 5.

E2.1. Resistencia a extracción lateral en cizalle simple de una pieza de madera conectada con clavos Anker 4x60 mm. a una placa de acero (Titan TTN240).

Datos:

$$\rho_k = 370 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad característica del pino radiata.}$$

$$d = 4 \text{ mm} \quad \text{Diámetro del clavo.}$$

$$d_{head} = 4 \text{ mm} \quad \text{Diámetro de la cabeza del clavo.}$$

$$l_{clavo} = 60 \text{ mm} \quad \text{Largo del clavo.}$$

$$s_{plate} = 3 \text{ mm} \quad \text{Espesor de la placa metálica.}$$

$$t_1 = l_{clavo} - s_{plate} = 57 \text{ mm} \quad \text{Profundidad de penetración.}$$

$$M_{y,Rk} = 6500 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad \text{Momento plástico característico del clavo, según catalogo Rothoblaas}$$

$$n_v = 12 \quad \text{Número de clavos que fijan el bracket al Muro de CLT.}$$

$$n_H = 12 \quad \text{Número de clavos que fijan el bracket a la losa de CLT.}$$

- Aplastamiento en la madera para diámetros < 8 mm., sin perforación guía.

$$f_{h,k} = 0,082 \times \rho_k \times d^{-0,3} = 20,02 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Parámetro característico de resistencia a la extracción, según catalogo Rothoblaas.

$$f_{ax,k} = 7,5 \frac{N}{mm^2}$$

- Parámetro característico de penetración de la cabeza.

$$f_{head,k} = 70 \times 10^{-6} \times \rho_k^2 = 9,58 \frac{N}{mm^2}$$

- Capacidad característica a extracción del conector.

$$F_{ax,Rk} = \min \begin{cases} f_{ax,k} \times d \times t_1 = 1,71 [kN] \\ f_{head,k} \times d_{head}^2 = 613,31 [N] \end{cases}$$

- Capacidad característica de carga por plano de corte del sujetador, considerando placa delgada ( $s_{plate} < 0,5 \times d$ )

$$F_{v,Rk(a)} = 0,4 \times f_{h,k} \times t_1 \times d = 1,826 [kN] \quad \text{Modo (a).}$$

$$F_{v,Rk(b)} = 1,15 \times \sqrt{2 \times M_{y,Rk} \times f_{h,k} \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 1,327 [kN] \quad \text{Modo (b).}$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} \text{Modo I} = 1,826 [kN] \\ \text{Modo II} = 1,327 [kN] \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 1,327 [kN]$$

- Capacidad característica de carga por plano de corte del sujetador, considerando placa gruesa ( $s_{plate} > 1d$ )

$$F_{v,Rk(c)} = f_{h,k} \times t_1 \times d \times \left( \sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,k} \times t_1^2 \times d}} - 1 \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 2,203 [kN] \quad \text{Modo (c).}$$

$$F_{v,Rk(d)} = 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,k} \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 1,813 [kN] \quad \text{Modo (d).}$$

$$F_{v,Rk(e)} = f_{h,k} \times t_1 \times d = 4,564 [kN] \quad \text{Modo (e).}$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} \text{Modo (c)} = 2,203 [kN] \\ \text{Modo (d)} = 1,813 [kN] \\ \text{Modo (e)} = 4,564 [kN] \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 1,813 [kN]$$

- Como  $0,5 \times d < s_{plate} < 1d$ , se realiza una interpolación lineal.

$$F_{v,Rk} = \frac{1,327 + 1,813}{2} = 1,570 \text{ [kN]}$$

$$n_v \times F_{v,Rk} = 18,84 \text{ [kN]}$$

$$n_H \times F_{v,Rk} = 18,84 \text{ [kN]}$$

E1.2. Resistencia a extracción directa de una pieza de madera conectada con clavos Anker 4x60 mm. a una placa de acero (Titan TTN240).

$$n_v \times F_{ax,Rk} = 7,36 \text{ [kN]}$$

### E3. Uibel & Blaß.

E3.1. Resistencia a extracción lateral en cizalle simple de una pieza de CLT conectada con clavos Anker 4x60 mm. a una placa de acero (Titan TTN240).

- Resistencia característica del aplastamiento de la madera en los paneles CLT.

$$f_{h,k} = 0,112 \times \rho_k^{1,05} \times d^{-0,5} = 27,85 \frac{N}{mm^2}$$

*Nota:* una vez calculada la resistencia al aplastamiento característico de los paneles CLT, se calcula la capacidad característica por plano de corte del conector utilizando las ecuaciones del EC 5.

- Capacidad característica de carga por plano de corte del sujetador, considerando placa delgada ( $s_{plate} < 0,5 \times d$ )

$$F_{v,Rk(a)} = 0,4 \times f_{h,k} \times t_1 \times d = 2,540 \text{ [kN]} \quad \text{Modo (a).}$$

$$F_{v,Rk(b)} = 1,15 \times \sqrt{2 \times M_{y,Rk} \times f_{h,k} \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 1,537 \text{ [kN]} \quad \text{Modo (b).}$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} \text{Modo I} = 2,540 \text{ [kN]} \\ \text{Modo II} = 1,537 \text{ [kN]} \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 1,537 [kN]$$

- Capacidad característica de carga por plano de corte del sujetador, considerando placa gruesa ( $s_{plate} > 1d$ )

$$F_{v,Rk(c)} = f_{h,k} \times t_1 \times d \times \left( \sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,k} \times t_1^2 \times d}} - 1 \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 2,943 [kN] \quad \text{Modo (c).}$$

$$F_{v,Rk(d)} = 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,k} \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 2,110 [kN] \quad \text{Modo (d).}$$

$$F_{v,Rk(e)} = f_{h,k} \times t_1 \times d = 6,349 [kN] \quad \text{Modo (e).}$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} \text{Modo (c)} = 2,943 [kN] \\ \text{Modo (d)} = 2,110 [kN] \\ \text{Modo (e)} = 6,249 [kN] \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 2,11 [kN]$$

- Como  $0,5 \times d < s_{plate} < 1d$ , se realiza una interpolación lineal.

$$F_{v,Rk} = \frac{1,537 + 2,11}{2} = 1,824 [kN]$$

$$n_v \times F_{v,Rk} = 21,89 [kN]$$

$$n_H \times F_{v,Rk} = 21,89 [kN]$$

