



FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**ESTUDIO DE FALLAS EN UNIONES PERMANENTES  
Y NO PERMANENTES EN PANELES DE MADERA  
CONTRA LAMINADA (CLT)**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: DRA. ING. KARIN SAAVEDRA

REDLICH

**HUGO ALFREDO YÁÑEZ DÍAZ**

**CURICÓ - CHILE  
2021**

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero agradecer principalmente a mi familia, mi madre, padre y hermanas, que gracias a su apoyo incondicional pude lograr llegar hasta este punto.*

*A mi tutora Karin Saavedra, por brindar de su tiempo y conocimientos en esta etapa, por guiarme y ayudarme para lograr desarrollar un buen trabajo de memoria.*

*Al profesor Diego Gormaz, por su tiempo, comprensión y dedicación que fueron de gran ayuda para realizar esta memoria.*

*A cada uno de los docentes de la Universidad, que fueron parte de mi formación profesional.*

*A mis compañeros y colegas, Joaquín y Jan, que me brindaron su ayuda siempre que lo necesitaba, gracias por ser parte de mi vida universitaria.*

*A mis amigas y amigos en especial a Carito, Memo e Iris que en todo momento estuvieron ahí para darme tranquilidad, risas y mucho cariño.*

*Y por último agradecer a mi pareja Beatriz, por su apoyo incondicional que me brindaba día a día, además de ser mi lugar de tranquilidad en los días más difíciles que tuve.*

## DEDICATORIA

*A mi familia y a mi perrita Millie*

## **RESUMEN**

La memoria presenta un estudio bibliográfico de fallas en uniones permanentes y no permanentes en paneles de madera contra laminada (CLT). Tiene como objetivo dimensionar y analizar uniones con paneles CLT mediante una simulación computacional.

Este proyecto de titulación recopila información sobre las fallas en uniones CLT de artículos científicos, los cuales son resumidos y clasificados. El fin de esto es presentar la falla más recurrente entre los artículos seleccionados y con esta información seleccionar la configuración para la simulación computacional por medio del programa ANSYS.

Por último, para concretar el informe se encuentra el análisis de los resultados y las conclusiones. La comparación de los resultados entre los artículos científicos y las simulaciones, analizando los cambios en la dirección de la fibra de los paneles y el tipo de conector.

## **ABSTRACT**

The report presents a bibliographic study of failures in permanent and non-permanent joints in cross-laminated timber (CLT) panels. It aims to dimension and analyze CLT panel joints by means of a computational simulation.

This degree project collects information on CLT joint failures from scientific articles, which are summarized and classified. The purpose is to present the most recurrent failure among the selected articles and with this information to select the configuration for the computational simulation by means of the ANSYS program.

Finally, to finalize the report is the analysis of the results and conclusions. The comparison of the results between the scientific articles and the simulations, analyzing the changes in the fiber direction of the panels and the type of connector.

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	4
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. ALCANCES.....	5
1.6. METODOLOGIA.....	5
1.7. RESULTADOS ESPERADOS.....	7
1.8. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	8
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. PANELES DE MADERA CONTRA LAMINADO.....	10
2.2. VENTAJAS DEL CONTRA LAMINADO.....	11
2.3. NORMATIVA EN AMERICA DEL Norte de CLT.....	11
2.4. REQUERIMIENTOS DE COMPONENTES CLT.....	12
2.4.1. Laminas.....	12

2.4.2.	Adhesivos .....	12
2.5.	DIMENSIONES Y TOLERANCIAS .....	13
2.6.	PROCESO DE MANUFACTURA DE CLT .....	14
2.6.1.	Selección de madera .....	14
2.6.2.	Agrupación de la madera.....	15
2.6.3.	Cepillado de la madera .....	15
2.6.4.	Corte de la longitud de las tablas.....	15
2.6.5.	Aplicación del adhesivo.....	15
2.6.6.	Apilamiento de las tablas.....	16
2.6.7.	Montaje del prensado.....	16
2.6.8.	Control de calidad, mecanizado y corte.....	16
2.6.9.	El embalaje y el envío de la comercialización del producto .....	16
2.7.	SISTEMAS DE UNION DE USO COMUN EN ENSAMBLES CLT .....	17
2.7.1.	Tornillos y tornillos autorroscantes .....	18
2.7.2.	Clavos .....	19
2.7.3.	Pernos y pasador .....	20
2.7.4.	Ranuras .....	21
2.7.5.	Juntas .....	22
2.7.6.	Placas de metal ocultas .....	23
2.8.	FALLAS EN UNIONES CLT.....	24
2.8.1.	Fallas en el panel CLT .....	24
2.8.2.	Fallas en los conectores .....	24
2.9.	ANALISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS .....	25
2.9.1.	Condiciones de borde .....	25
2.9.2.	Contactos .....	25



4.1.2.2.	Resultados considerando la fibra del CLT paralela a la dirección de la carga	57
4.1.3.	Configuración perno M12x100 .....	58
4.1.3.1.	Resultados considerando la fibra del CLT perpendicular a la dirección de la carga	58
4.1.3.2.	Resultados considerando la fibra del CLT paralela a la dirección de la carga	59
4.1.4.	Comparación de resultados por ensayos y simulación .....	61
4.2.	DEFORMACIONES EN LOS PANELES CLT .....	62
4.2.1.	Deformaciones paneles CLT utilizando tornillos M12 .....	62
4.2.2.	Deformaciones paneles CLT utilizando tornillos M16 .....	63
4.2.3.	Deformaciones paneles CLT utilizando pernos M12 .....	64
4.3.	DEFORMACIONES EN LOS CONECTORES .....	65
4.3.1.	Deformaciones tornillos M12.....	66
4.3.2.	Deformaciones tornillos M16.....	67
4.3.3.	Deformaciones pernos M12.....	68
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES .....	70
	CONCLUSIONES.....	71
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	73
	ANEXO 1: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 1 .....	75
	ANEXO 2: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 2.....	81
	ANEXO 3: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 3 .....	89
	ANEXO 4: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 4 .....	97
	ANEXO 5: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 5 .....	103
	ANEXO 6: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 6.....	111
	ANEXO 7: TABLA DE PROPIEDADES PANEL CLT .....	118

ANEXO 8: VIGA DE ACERO “HOT ROLLED” SECCION i .....	119
ANEXO 9: PROPIEDADES MECANICAS CONECTORES .....	120

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1: Sección transversal de un panel de CLT de 5 capas (Erol Karacabeyli, 2013)	10
Ilustración 2.2: Configuración panel CLT (Erol Karacabeyli, 2013).....	10
Ilustración 2.3 Contralaminado (izquierda) vs laminado (derecha)(Erol Karacabeyli, 2013) ..	11
Ilustración 2.4: Nueve pasos para el proceso de CLT (Erol Karacabeyli, 2013) .....	14
Ilustración 2.5 Unión de CLT de piso con paredes utilizando tornillos autorroscantes (Erol Karacabeyli, 2013).....	18
Ilustración 2.6 Unión de CLT de piso con paredes utilizando clavos (Erol Karacabeyli, 2013) .....	19
Ilustración 2.7 Unión pared con pared utilizando unión por pernos (Erol Karacabeyli, 2013)	20
Ilustración 2.8 Unión de paneles utilizando ranura interna (Erol Karacabeyli, 2013) .....	21
Ilustración 2.9 Unión de paneles por junta superpuesta (Erol Karacabeyli, 2013) .....	22
Ilustración 2.10 Unión de CLT de piso con paredes utilizando placas de metal ocultas (Erol Karacabeyli, 2013).....	23
Ilustración 3.1 Mallado y refinamiento en estructura 3D.....	49
Ilustración 3.2 Simetría en sección viga I.....	50
Ilustración 3.3 Condiciones de borde para 2 pernos M12 .....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla Resumen artículo 1 .....	28
Tabla 2 Tabla Resumen artículo 2.....	30
Tabla 3 Tabla Resumen paper 3 .....	32
Tabla 4 Tabla Resumen paper 4 .....	34
Tabla 5 Tabla Resumen paper 5 .....	36
Tabla 6 Tabla Resumen paper 6 .....	39
Tabla 7 Tabla comparativa deformaciones plásticas en tornillos.....	43
Tabla 8 Vista frontal y lateral de las 3 configuraciones .....	46
Tabla 9 Partes para las 3 configuraciones .....	47
Tabla 10 Elementos para modelo 3D usando tornillos M12 .....	47
Tabla 11 Elementos para modelo 3D usando tornillos M16 .....	48
Tabla 12 Elementos para modelo 3D usando perno M12 .....	48
Tabla 13 Elementos y nodos para cada configuración .....	49
Tabla 14 Contactos tornillos.....	51
Tabla 15 Contactos pernos .....	51
Tabla 16 Resultados Tornillo M12.....	59
Tabla 17 Resultados Tornillo M16.....	60
Tabla 18 Resultados Perno M12.....	60
Tabla 19 Tabla comparativa carga máxima.....	61
Tabla 20 Deformaciones paneles con tornillos M12 .....	62
Tabla 21 Deformaciones paneles con tornillos M16 .....	63
Tabla 22 Deformaciones paneles con pernos M12.....	64
Tabla 23 Deformaciones plásticas tornillo M12.....	66
Tabla 24 Deformaciones plásticas tornillo M16.....	67
Tabla 25 Deformaciones plásticas perno M12 .....	68

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN**

La madera es un material orgánico muy utilizado en la fabricación de mobiliarios y en la construcción de estructuras para viviendas, tales como techos, vigas y marcos. En los últimos años en base a estudios e investigaciones, se han desarrollado productos de madera ingenieril con capacidad estructural cada vez más elevada. Así, la madera contra laminada (o CLT por “Cross Laminated Timber” en inglés) es una alternativa que esta paulatinamente reemplazando al hormigón y acero en la construcción de edificaciones. (Madera Estructural Wordpress, 2019)

El CLT es capaz de simplificar procesos de una obra, permite una construcción más ligera, más rápida, más económica, no genera desechos y su huella de carbono es significativamente más baja en comparación al uso de hormigón (Zúñiga, Madera 21, 2019). El diseño, la logística, el transporte y el ensamblado son parte de una nueva metodología de trabajo, logrando maximizar el control, la toma de decisiones y tiempos de construcción. Por esto, este tipo de edificación también ofrece ventajas ante catástrofes o emergencias, creando viviendas temporales, ampliaciones de complejos hospitalarios y educacionales (Karin Saavedra, Mariela Reyes, 2020)

## **1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

En Chile se están realizando las primeras construcciones utilizando madera contra laminada, aunque todavía es una tecnología nueva, es una oportunidad para nuevas edificaciones en Chile y el mundo. (Diario Sustentable, 2020). Existen varios proyectos que buscan utilizar este tipo de material. Por ejemplo, en la universidad de Talca se está comenzando a investigar sobre la madera contra laminada, pero al ser un tema muy amplio hay ciertos estudios que no se han investigado a fondo, uno de ellos son las uniones en los paneles de este material.

En la literatura se han estudiado las uniones con sus posibles fallas, mayoritariamente, a través de ensayos experimentales (tracción, compresión, fractura interlaminar). Sin embargo, las simulaciones computacionales no han sido amplia y detalladamente abordadas, siendo la predicción de las fallas uno de los principales desafíos. (Zúñiga, Madera 21, 2020). Este estudio aplica a futuros proyectos que puedan realizarse en la Universidad de Talca, gracias a este informe científico contribuirá a la confección de proyectos e incluso tesis que se realicen para construir, modelar y/o dimensionar ciertas aplicaciones con madera contra laminada, de forma que exista un respaldo para poder realizarlo con mayor seguridad y eficacia.

### **1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA**

Esta memoria propone realizar una investigación sobre las principales fallas existentes en las uniones más utilizadas en la construcción con CLT.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Dimensionar fallas en uniones permanentes y no permanentes en paneles de madera contra laminada (CLT) mediante mecánica computacional.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Presentar los aspectos teóricos involucrados para el desarrollo de la solución de la problemática.
- Realizar un estudio bibliográfico de ensayos de análisis de fallas en uniones permanentes y no permanentes en paneles CLT.
- Analizar los tipos de fallas y seleccionar uno en base a los parámetros definidos.
- Simular el daño en una unión de CLT utilizando el método de elementos finitos.

## 1.5. ALCANCES

El informe propone recopilar bibliografía sobre ensayos de uniones permanentes y no permanentes con CLT y resumir una selección de trabajos que aborden tipos de fallas. Luego se seleccionará un tipo de falla, sea la más recurrente o la que más daño provoca en el panel CLT, uniones y/o en soportes. Luego, se podrá simular por elementos finitos el tipo de falla seleccionado. Por último, en base al estudio realizado se comparan diferentes tipos de conectores para un ensamble con paneles CLT, además de analizar la orientación de los paneles y ver los daños por medio de elementos finitos.

## 1.6. METODOLOGIA

La metodología es la de una investigación aplicada. Primero se buscará información en revistas, guías, libros y publicaciones científicas de ensayos en uniones. Una vez seleccionado un caso de prueba, este será resuelto a través de mecánica computacional para obtener un informe científico. A continuación, se detalla la metodología para cada objetivo específico:

- I. Presentar los aspectos teóricos involucrados para el desarrollo de la solución de la problemática.
  - **Actividades**
    - Plan para la metodología de estudio
    - Estudio bibliográfico para el desarrollo del marco teórico
  - **Resultados Esperados**
    - Retroalimentación del desarrollo del marco teórico, seleccionando los puntos importantes del informe.
    - Informe bibliográfico de los aspectos teóricos de la madera contra laminada (CLT) y sus tipos de uniones.
    - **Recursos y duración:** 78 horas efectivas en 22 semanas

## Capítulo 1. Introducción

II. Realizar un estudio bibliográfico de ensayos de análisis de fallas en uniones permanentes y no permanentes en paneles CLT

- **Actividades**

- Investigación bibliográfica
- Resumir ensayos seleccionados
- Aplicar normas al informe bibliográfico

- **Resultados Esperados**

- Recopilación de información sobre ensayos de uniones-CLT
- Resumen de cada ensayo analizado
- Bibliografía de la normativa

- **Recursos y duración:** 182 horas efectivas en 14 semanas

III. Analizar los tipos de fallas y seleccionar uno en base a los parámetros de fallos definidos.

- **Actividades**

- Análisis de los resultados de la investigación realizada
- Definir parámetros de selección

- **Resultados Esperados**

- Comparación de resultados
- Obtención de la falla a simular

- **Recursos y duración:** 20 horas efectivas en 4 semanas

IV. Simular el daño en una unión de CLT utilizando el método de elementos finitos

- **Actividades**

- Simulación computacional de los conectores
- Análisis de resultados

- **Resultados Esperados**

- Diseño de una unión mediante mecánica computacional, por el programa ANSYS
- Tabla comparativa de los resultados obtenidos y lo realizado en el estudio bibliográfico.

- **Recursos y duración:** 90 horas efectivas en 6 semanas

## **1.7. RESULTADOS ESPERADOS**

Se espera un informe con información detallada y clasificada de las uniones permanentes y no permanentes en los paneles de CLT. Para complementar la información se espera realizar un estado del arte del material, donde dé lugar a la caracterización de la madera contra laminada.

El estudio también incluirá las normativas de construcción con madera y paneles de madera contra laminada.

También se realizará el diseño de una unión mediante mecánica computacional, utilizando el programa ANSYS para la simulación. Luego de la selección de la unión, se busca comparar diferentes conectores con el fin de ver la influencia de ellos y el tipo de panel CLT, con esto mejorar su configuración y/o propiedades, además de buscar la mejor opción de montaje entre ellos, dando así una solución a este problema de ingeniería.

## **1.8. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO**

El primer capítulo de este informe contextualiza el tema propuesto, para ello se presentan los antecedentes y motivación, la descripción del problema, la solución propuesta, los objetivos, alcances y restricciones, metodologías y herramientas utilizadas que abordan los objetivos específicos del informe, y por último los resultados esperados.

El segundo capítulo se enfoca en entregar toda la información necesaria para poder cumplir con el objetivo de esta problemática, donde se presenta un marco teórico que describe cada punto importante desde lo más básico que es la descripción de un panel CLT hasta los procesos de manufactura de un panel CLT. Además, presenta los tipos de uniones más utilizados en la construcción con CLT.

El tercer capítulo aborda el desarrollo de la solución de la problemática. Este capítulo contempla el estudio bibliográfico de los ensayos de las uniones permanentes y no permanentes con paneles CLT, mostrando una recopilación de datos de cada artículo analizado, la selección de la unión a simular en base a la definición de parámetros de selección de esta y la metodología para la simulación de esta unión mediante mecánica computacional para tres conectores, por el programa ANSYS.

Para finalizar se presenta en el capítulo 4 el análisis de resultados y las conclusiones de la memoria realizada.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

## 2.1. PANELES DE MADERA CONTRA LAMINADO

La madera contralaminada o CLT se define como un producto prefabricado de madera sólida maciza de ingeniería. Los paneles CLT están fabricadas normalmente con un numero impar de capas (de tres a siete), siendo apiladas en ángulos de 90° en la mayoría de los casos, dando una forma rectangular sólida al panel. En la ilustración 2.1 se aprecia la sección transversal de los paneles CLT (Waugh Thistleton, 2018). Las capas transversales y longitudinales se fijan entre ellas con adhesivos estructurales. Existen configuraciones especiales donde se colocan capas en la misma dirección, dejando una especie de doble capa.

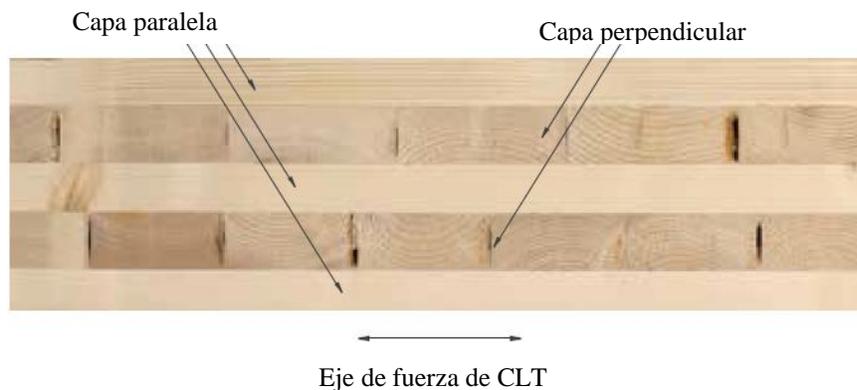


Ilustración 2.1: Sección transversal de un panel de CLT de 5 capas (Erol Karacabeyli, 2013)

Las capas exteriores de los paneles CLT que son utilizadas como paredes, se orientan normalmente de forma paralela a la gravedad, maximizando la capacidad de carga vertical de la pared. Para el sistema de piso y techo las capas externas van paralelas a la dirección de envergadura mayor. En la ilustración 2.2 se muestran las direcciones de apilamiento de un CLT (Erol Karacabeyli, 2013)

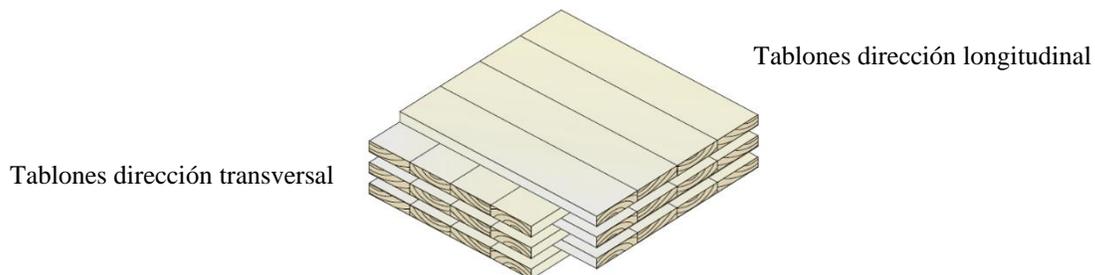


Ilustración 2.2: Configuración panel CLT (Erol Karacabeyli, 2013)

## 2.2. VENTAJAS DEL CONTRA LAMINADO

La madera contra laminada utilizada para paneles prefabricados en paredes o suelo ofrecen muchas ventajas, proporcionando mayor estabilidad dimensional del producto, permitiendo la prefabricación de losas de suelo largas y anchas, paredes largas de un solo piso y placas altas en condiciones de altura. El CLT proporciona propiedades de resistencia y rigidez relativamente alto en las capas exteriores y en las interiores del CLT, proporcionando una capacidad bidireccional similar a la losa de hormigón armado. El efecto de la contra laminación aumenta la resistencia a la ruptura en comparación a otros tipos de sistemas como el panel laminado (ver ilustración 2.3) (Waugh Thistleton, 2018).

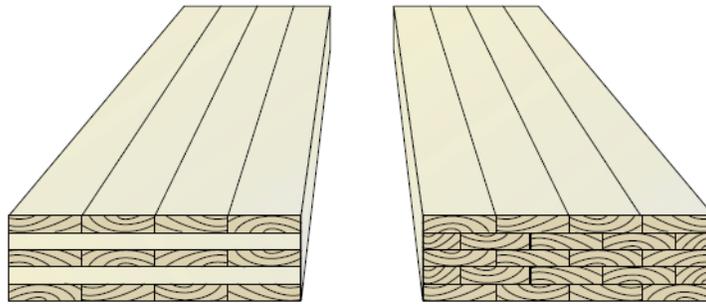


Ilustración 2.3 Contralaminado (izquierda) vs laminado (derecha)(Erol Karacabeyli, 2013)

## 2.3. NORMATIVA EN AMERICA DEL NORTE DE CLT

La aceptación de nuevos materiales o sistemas de construcción deben pasar por un consenso basado en el producto, siendo esencial para los diseñadores y agencias reguladoras. En base a esta necesidad de regular, la APA y la asociación de Madera de Ingeniería (The Engineered Wood Association) de los Estados Unidos y la empresa privada FPIinnovations en Canadá, iniciaron un proceso en conjunto de desarrollo de normas en el año 2010. (Erol Karacabeyli, 2013). La primera norma CLT norteamericana se concretó en diciembre del 2011 como la norma ANSI/APA PRG 320 (ANSI/ APA PRG 320., 2017)

## **2.4. REQUERIMIENTOS DE COMPONENTES CLT**

El CLT se fabrica con capas de madera, como la madera de chapa laminada (LVL), madera de filamentos laminados (LSL), o madera de filamentos orientados (OSL), que están unidos con adhesivos estructurales a través de las juntas de las caras, de los extremos y/o de los bordes.

Los componentes seleccionados y los procesos de fabricación (aplicación de adhesivo, prensado de paneles, etc.) deben ser considerados cuidadosamente para asegurar fiabilidad y la consistencia del producto. Los productos de CLT evaluados para el cumplimiento del código por un organismo de certificación de productos o un servicio de evaluación reconocidos conforme a la norma ANSI/APA PRG 320, proporcionan a los diseñadores una garantía de calidad del producto y rendimiento. (ANSI/ APA PRG 320., 2017)

### **2.4.1. Laminas**

La norma ANSI/APA PRG 320 se basó en la experiencia europea en teorías de ingeniería y procesos de fabricación del CLT, las características de recurso maderero norteamericano, la manufacturación y las expectativas del uso final de CLT. Se permite el uso de cualquier tipo de madera o alguna combinación de madera reconocidas por el comité americano de normas de madera “American Lumber Standards Committee” (ALSC). (Erol Karacabeyli, 2013)

El espesor neto de laminación para cada capa debe ser en un rango de 5/8” (16 mm) y 2” (51 mm). La laminación no tiene permitido variar el espesor dentro de la misma capa, exceptuando cuando está dentro de las tolerancias de espesor de laminación. El ajuste de las tolerancias puede ser reajustado durante la verificación de calidad, con el fin de tener un rendimiento aceptable en la unión de cara. (Erol Karacabeyli, 2013)

### **2.4.2. Adhesivos**

Otro componente importante para el CLT son los adhesivos. La norma exige que cumplan los requisitos de la norma AITC 405 (ANSI/AITC 405 , 2013), los productos CLT dentro de esta norma que tiene por objetivo resistir los efectos de humedad y rendimiento estructural. El

cumplimiento de la norma ayuda a que exista una seguridad en el uso de los productos CLT, evitando retrasos en construcciones, deformación en paneles u otras condiciones de carácter grave en la construcción (derrumbes, desalineación, pandeo, entre otros). (Erol Karacabeyli, 2013). Se han utilizado con éxito varios tipos de adhesivos estructurales en la producción de CLT, como se indica a continuación. (Madera Estructural Wordpress, 2019)

- **Tipos fenólicos como el fenol-resorcinol formaldehído (PRF):** Adhesivo más común para la madera, es un adhesivo fuerte y duradero en condiciones secas y húmedas de gran adherencia.
- **Polímero de emulsión de isocianato (EPI):** Adhesivo de alta flexibilidad, baja fluencia, no introduce humedad en la madera, resistente al agua en temperaturas altas y bajas.
- **Mono componente de Poliuretano (PUR):** Adhesivo utilizado principalmente para la unión de capas como el laminado en madera. Una ventaja de este adhesivo es su reacción de los isocianatos con el hidrogeno activo en la superficie, substrato o aire, haciendo posible el encolado de superficies con diferentes humedades.

### 2.5. DIMENSIONES Y TOLERANCIAS

Para la fabricación de CLT las dimensiones están limitadas por la norma ANSI/APA PRG 320, esta implica que el grosor de CLT limitado para la producción es de 20” (508 mm). El ancho de laminación debe ser de al menos 1,75 veces el espesor de laminación de las tablas paralelas ubicadas en la dirección de fuerza mayor del CLT. (ANSI/ APA PRG 320., 2017). Las tolerancias dimensionales permitidas por la norma en la fabricación son:

- Espesor:  $\pm 1/16$  de pulgada (1,6 mm) el 2% del grosor del CLT
- Ancho:  $\pm 1/8$  de pulgada (3,2 mm) del ancho del CLT
- Longitud:  $\pm 1/4$  de pulgada (6,4 mm) de la longitud del CLT

Esta permitido que texturas u otros acabados en las caras o bordes alteren las tolerancias anteriores. Si sucede esto se debe compensar cualquier pérdida de fuerza especifica en la sección transversal debido a estas alteraciones.

## 2.6. PROCESO DE MANUFACTURA DE CLT

Para lograr la fabricación de los paneles CLT se necesitan de muchos pasos, desde la obtención de tablas hasta el proceso de despacho del panel. Los 9 pasos se esquematizan en la ilustración N° 2.4 y se describen a continuación. (Erol Karacabeyli, 2013)

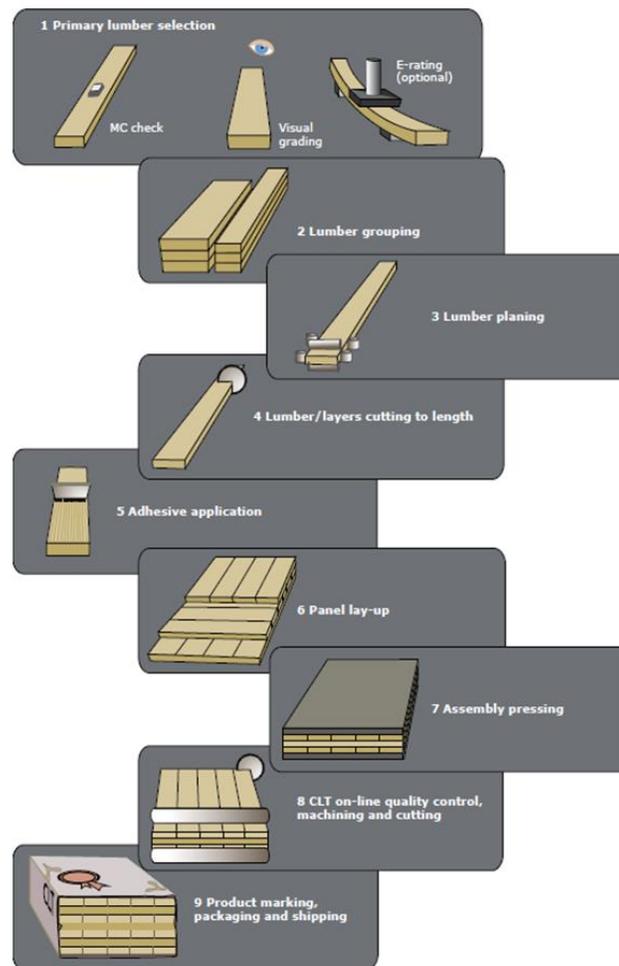


Ilustración 2.4: Nueve pasos para el proceso de CLT (Erol Karacabeyli, 2013)

### 2.6.1. Selección de madera

Los fabricantes de madera producen dos grados de paneles CLT, de construcción (paneles interiores) y de apariencia (para exterior, con características estéticas). La de construcción es de clase “E” y la madera para fines estéticos son de clase “V”. Para el proceso de adhesión de los paneles, se necesita que la madera esté cepillada en sus 4 caras para una mejor adhesión. El

cepillado puede alterar el grado de la madera, por lo que se requiere volver a verificar su grado para una mejor manufacturación.

### **2.6.2. Agrupación de la madera**

La agrupación de la madera depende de los requerimientos que se deseen obtener, normalmente son en base la dirección de la fuerza. Se requiere que la madera en la dirección donde la fuerza es mayor tenga las mismas propiedades (normalmente de clase E), así mismo para se requiere donde la fuerza es menor.

### **2.6.3. Cepillado de la madera**

Como se mencionó antes, el cepillado en la madera ayuda a limpiar las caras de la madera, reduciendo su oxidación y mejorando la eficiencia del colado. Es recomendable cepillar todas las caras de la madera, pero existen casos en donde no es necesario cepillarlas toda, estos casos son cuando la tolerancia de anchura es aceptable y no existe colado en algunas caras.

### **2.6.4. Corte de la longitud de las tablas**

Proceso donde se cortan las tablas o paneles a lo largo para el proceso de apilamiento. Las capas transversales pueden generarse a partir de las capas longitudinales, si se utiliza el mismo grado y tamaño de madera para las capas paralelas y perpendiculares.

### **2.6.5. Aplicación del adhesivo**

El proceso para el colado en las tablas es un proceso donde las tablas circulan por una cámara que se mueve generalmente a una velocidad entre 18 m por minuto a 60 m por minuto. Idealmente las tablas se humedecen con agua nebulizadora que facilita la reacción de curado cuando se aplica el adhesivo PUR. La aplicación del adhesivo, idealmente pareja, debe realizarse poco después del cepillado, sobre superficies limpias y libres de material particulado que puedan repeler del adhesivo. Con esto se asegura de posibles problemas que pueda tener como oxidación en la superficie, inestabilidad dimensional, humectación y eficiencia de la adhesión.

El encolado de los bordes de las piezas de madera que componen las capas de CLT no es una práctica común entre los fabricantes debido al costo de fabricación adicional. Para que el encolado de los bordes sea efectivo, el cepillado de los bordes debe hacerse con antelación.

### **2.6.6. Apilamiento de las tablas**

El apilamiento de las capas de CLT es realizado por el operador de la máquina, el cual tiene como objetivo seguir la orientación designada para un cierto requerimiento.

### **2.6.7. Montaje del prensado**

El prensado es un proceso muy importante en la fabricación de CLT, necesario para el correcto encolado entre capas. Los 2 tipos de prensado principales que se utilizan son el prensado en frío (membrana flexible) y prensa hidráulica (placa rígida). Una prensa de vacío genera una presión de sujeción máxima teórica de 14,5 psi (0,1 MPa). Esta baja presión puede no ser suficiente para suprimir la posible deformación de las capas y superar sus irregularidades superficiales. Por otro lado, una prensa hidráulica rígida puede generar una presión de sujeción vertical y lateral mucho más alta. Para minimizar los posibles huecos entre los trozos de madera de las capas principales, se recomienda una presión de sujeción lateral en el rango de 40 a 80 psi (276 a 550 kPa).

Los adhesivos estructurales de secado en frío como PRE, EPI y PUR se usan para evitar calentar los paneles durante el prensado. El tiempo de prensado requerido es generalmente de 10 minutos a varias horas dependiendo del tipo de adhesivo.

### **2.6.8. Control de calidad, mecanizado y corte**

Terminado el proceso de prensado el panel pasa a una máquina lijadora. Después de lijar, los paneles CLT se transportan a una estación de mecanizado donde una máquina de corte de control numérico dimensiona los paneles para aberturas de ventanas y puertas en caso de ser requeridas.

### **2.6.9. El embalaje y el envío de la comercialización del producto**

El marcado del producto asegura que el producto correcto sea especificado, entregado e instalado. También es un importante la evaluación de conformidad del producto permitiendo la autenticidad de este, por lo que deben llevar el sello de una agencia aprobada que inspeccione el fabricante. (ANSI/ APA PRG 320., 2017) (Erol Karacabeyli, 2013)

## **2.7. SISTEMAS DE UNION DE USO COMUN EN ENSAMBLES CLT**

Las uniones en CLT juegan un papel esencial en la provisión de fuerza, rigidez, estabilidad y ductilidad a la estructura, por lo que se necesita de un buen diseño de construcción, ya que las fallas estructurales no solo son causadas por desastres naturales (terremotos, huracanes, etc) si no también son producidas por uniones mal diseñadas e instaladas. (Diario Sustentable, 2020)

Hoy en día, existen diversos tipos de sujetadores con distintos detalles de unión que pueden usarse para instaurar uniones tales como de panel-panel, pared-pared, pared-piso. Además, se pueden utilizar para conectar los paneles de CLT con otros materiales como la madera, hormigón o acero en construcciones híbridas. (Erol Karacabeyli, 2013)

A pesar de que los fabricantes del CLT recomiendan mayormente tornillos largos autorroscantes utilizados comúnmente para unir paneles en conjunto de pisos y de piso a pared, también los sujetadores tradicionales tipo clavija (ya sea tornillos de madera, clavos, tira fondos, pernos, entre otros) se pueden usar eficazmente para conectar elementos de paneles entre sí.

Es importante destacar que algunos sistemas de uniones innovadoras están abriendo camino al mercado de la construcción de CLT. Entre ellos, se puede mencionar, a modo de ejemplo, las varillas encoladas, el sistema KNAPP y otros tipos de sistemas que abarcan conceptos similares. Estas estructuras tienen un buen potencial para su uso donde se puede aplicar el CLT, especialmente aquellas donde su prefabricación es compleja. (Erol Karacabeyli, 2013)

### 2.7.1. Tornillos y tornillos autorroscantes

De fácil instalación, con gran capacidad de soporte de carga axial, lateral y combinadas, hace una de las uniones más utilizadas en CLT (ver Ilustración 2.5). Los tornillos para madera y los tornillos autorroscantes vienen en una variedad de tamaños y características específicas. Los tornillos autorroscantes están disponibles en diámetros de hasta 14 mm (0,55 pulgadas) y longitudes de hasta 1500 mm (59 pulgadas). (Erol Karacabeyli, 2013).

El panel CLT no requiere una prefabricación de agujeros como lo es en otros tipos de madera, el tipo de tornillo a usar dependerá de la densidad de la madera utilizada y su geometría.

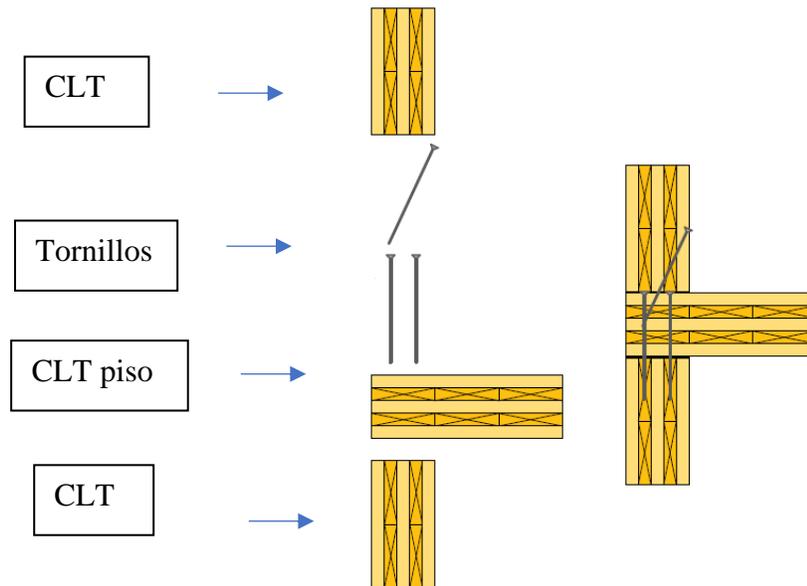


Ilustración 2.5 Unión de CLT de piso con paredes utilizando tornillos autorroscantes (Erol Karacabeyli, 2013)

### 2.7.2. Clavos

Los clavos de anclaje ranurado o de rosca helicoidal, se utilizan principalmente con placas y soportes de metal perforado y se instalan en la superficie del panel (ver Ilustración 2.6). Los tipos de fijación de superficie como los clavos no deben ser clavados en el borde de los paneles CLT debido a fracturas en el panel y/o cesión del clavo. A continuación, en la ilustración 2.7 se aprecia la unión utilizando clavos. (Rothoblaas, 2019)

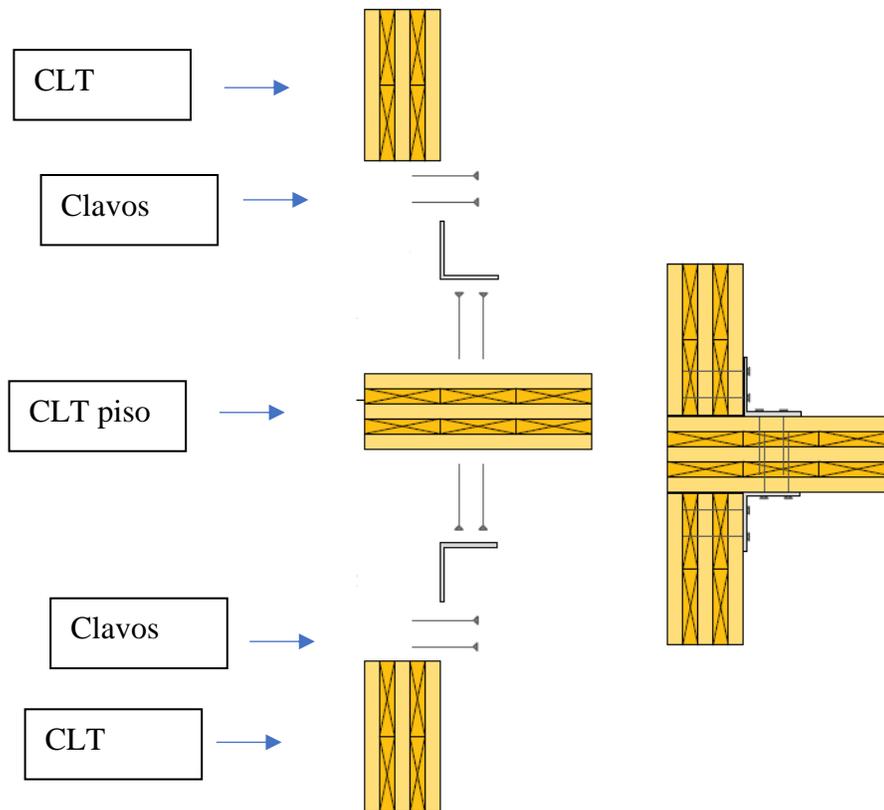


Ilustración 2.6 Unión de CLT de piso con paredes utilizando clavos (Erol Karacabeyli, 2013)

### 2.7.3. Pernos y pasador

Los pernos y pasadores son muy comunes en la construcción con madera pesada y en el ensamblaje de los paneles CLT, especialmente para la carga lateral (ver ilustración 2.7). Si se instalan en la cara estrecha (en el borde), se debe tener cuidado durante el diseño, especialmente en los paneles con bordes que no estén pegados entre sí. Esto podría eventualmente comprometer la resistencia lateral, ya que existe la posibilidad de que tales pasadores se claven en los huecos. (Rothoblaas, 2019)

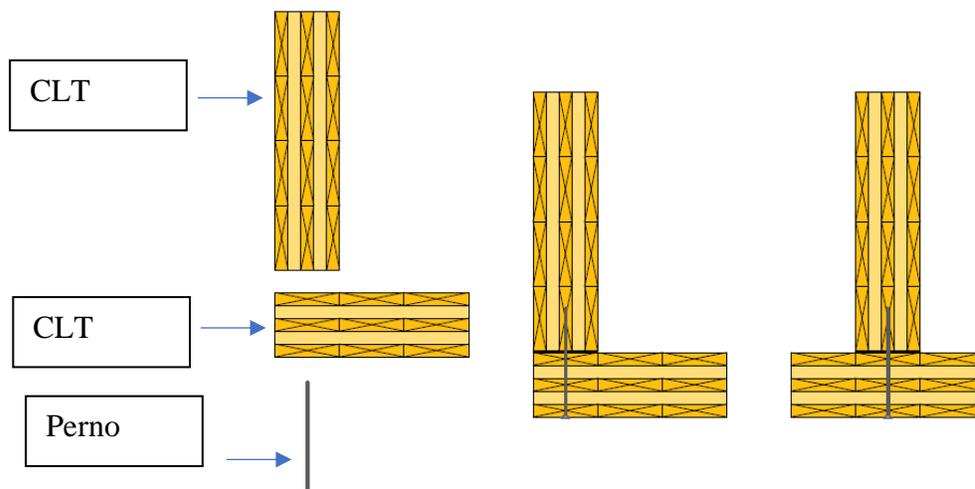


Ilustración 2.7 Unión pared con pared utilizando unión por pernos (Erol Karacabeyli, 2013)

#### 2.7.4. Ranuras

La conexión entre la(s) ranura(s) y los dos bordes del panel podría establecerse utilizando tornillos autorroscantes, tornillos para madera o clavos (ver Ilustración 2.8). Una ventaja de este método es que proporciona una conexión de doble cizalladura. Además, como ventaja el adhesivo estructural podría aplicarse al sujetador proporcionando mejoras en la unión. Las ranuras pueden ser de ranura interna, ranura superficial y de doble ranura superficial (Erol Karacabeyli, 2013)

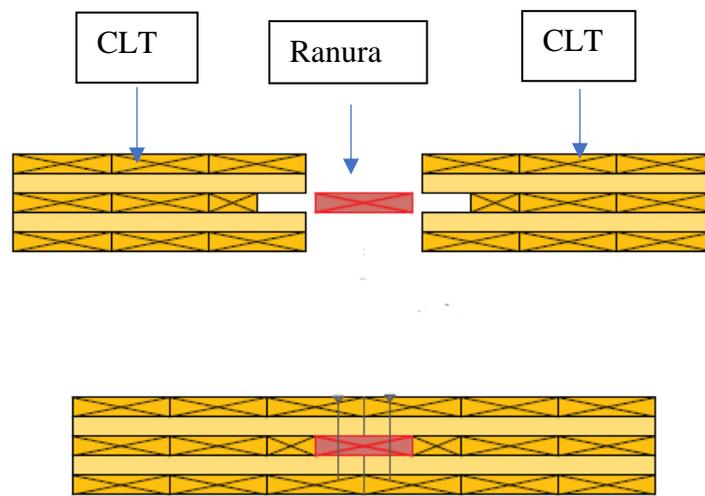


Ilustración 2.8 Unión de paneles utilizando ranura interna (Erol Karacabeyli, 2013)

### 2.7.5. Juntas

Esta unión implica el fresado de ambos paneles como se muestra en la ilustración 2.9. Se utiliza tornillos largos autorroscantes para conectar los bordes de los paneles. La junta puede soportar cargas normales y transversales, pero no es resistente a momentos. (Erol Karacabeyli, 2013)

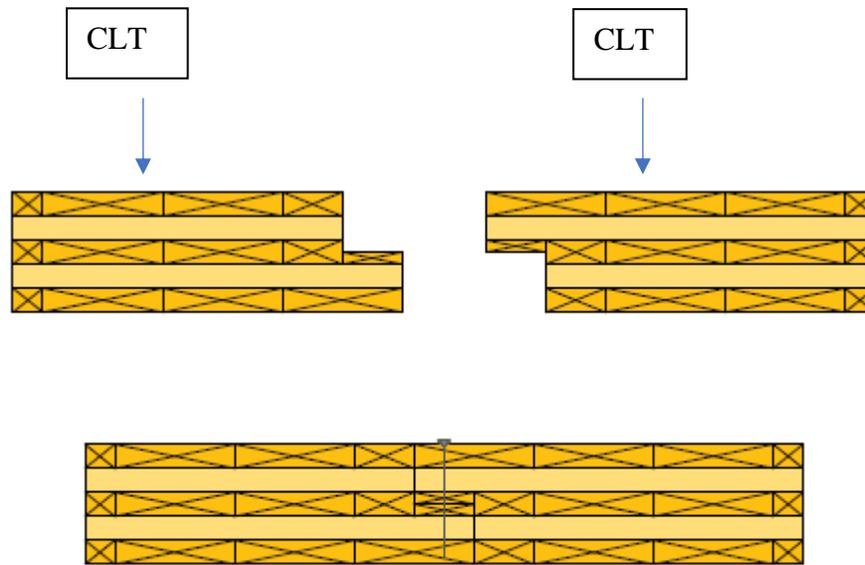


Ilustración 2.9 Unión de paneles por junta superpuesta (Erol Karacabeyli, 2013)

### 2.7.6. Placas de metal ocultas

Las placas metálicas ocultas también se utilizan para conexiones de paneles CLT. Si bien este sistema tiene ventajas considerables con respecto a las placas y soportes expuestos, especialmente en lo que se refiere a la resistencia al fuego, el sistema requiere un perfilado preciso en la planta utilizando tecnología de mecanizado CNC (ver Ilustración 2.10). (Erol Karacabeyli, 2013)

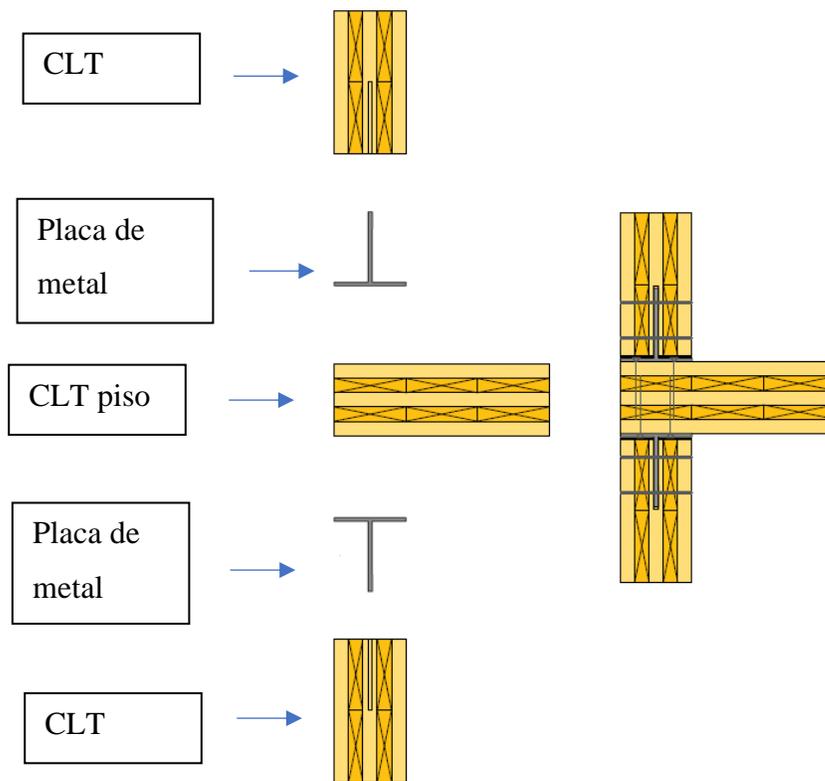


Ilustración 2.10 Unión de CLT de piso con paredes utilizando placas de metal ocultas (Erol Karacabeyli, 2013)

## 2.8. FALLAS EN UNIONES CLT

El tema central de este análisis es saber dónde y cómo ocurren las fallas en un conjunto conector de paneles CLT. En el próximo capítulo (3) se muestran en detalle las fallas descritas en una selección de artículos científicos. Las más comunes son las siguientes:

### 2.8.1. Fallas en el panel CLT

- **Desgarro y aplastamiento en el panel:** Ocurre normalmente en la primera capa del panel CLT, esta es producida por la carga aplicada al conector, se genera una resistencia en el panel que luego de superar su límite elástico comienza a ceder y a deformarse dejando grietas de forma comprimidas en el panel.
- **Empotramiento:** El conector al ser sometido a cargas perpendiculares a él, puede quedar incrustado en el panel CLT. Este tipo de falla separa en dos al conector, y una parte de este queda empotrada en el panel.
- **Punzado o perforado:** Ocurre cuando la magnitud de la fuerza del pretensado del perno es mayor que la resistencia a la compresión del panel CLT.

### 2.8.2. Fallas en los conectores

- **Deformación plástica:** Esta falla es la más común en los conectores investigados, esta falla ocurre cuando el esfuerzo de fluencia sobrepasa su límite elástico, dejando una o dos zonas con deformaciones plásticas a lo largo del conector.
- **Falla por cesión:** Esta falla ocurre cuando el conector, normalmente en clavos y tornillos se desvinculan del panel. Esto ocasiona deformaciones plásticas en los conectores y desgarro en el panel.
- **Falla por fractura (corte):** El conector comienza a agrietarse, luego de esto ocurre la separación de esta pieza en dos o más partes.

## 2.9. ANALISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Para realizar un análisis mediante elementos finitos se utilizará el software ANSYS. A continuación, se definen las etapas necesarias para realizar una simulación.

### 2.9.1. Condiciones de borde

Las condiciones de borde en las simulaciones se usan para fijar o desplazar ciertos elementos de una estructura mediante cargas, presiones, soportes fijos, entre otros. (Budynas–Nisbett, 2006)

### 2.9.2. Contactos

Para el análisis estructural, los contactos se generan por pares, es decir, por nodo (punto a punto), nodo a superficie y entre superficies. Es importante tener el conocimiento previo a la hora de designar contactos, en función al tipo de problema que se desea resolver. (Sunar, 2021)

- **Bonded (pegadas):** Se aplica a todas las regiones de contactos (superficies, solidos, aristas, caras, líneas). Si se usa este tipo de contacto, las regiones de contacto se encuentran pegadas, no permite deslizamiento ni separación entre ellas.
- **No Separation (sin separación):** Crea un vínculo entre los objetos. Existe posibilidad de desplazamiento.
- **Frictionless (sin fricción):** Solución no lineal ya que el área de contacto cambia a medida que se aplica la carga. Coeficiente cero de fricción, por lo tanto, existe deslizamiento libre.
- **Frictional (fricción):** Ambas geometrías en contacto pueden soportar tensiones de corte hasta una determinada magnitud antes de que empiecen a deslizarse una respecto a la otra. El coeficiente de fricción puede ser cualquier valor no negativo.
- **Rough (rugoso):** Modela un contacto friccional perfectamente rugoso donde no hay deslizamiento.

## **CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA**

### **3.1. INTRODUCCIÓN**

Este capítulo presenta los procesos y líneas de acción clave en el desarrollo de la solución propuesta. Considera el estudio bibliográfico de ensayos de conectores en paneles CLT, la selección del tipo de falla a simular y la metodología para la simulación.

### **3.2. ENSAYOS “PAPER” DE CONECTORES Y PANELES CLT**

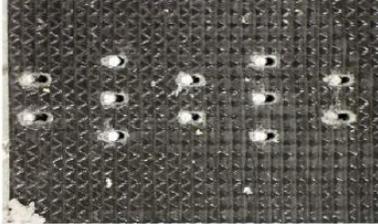
Se realizó un estudio bibliográfico de seis artículos científicos indexados en Web of Science, publicados en los últimos 5 años, sobre ensayos experimentales en uniones en paneles CLT, sometidas a grandes cargas para determinar las principales fallas en el conector como en el panel CLT. Para cada trabajo se extrajo la siguiente información: identificación; descripción general; materiales utilizados; configuración y montaje; interpretación de resultados; conclusiones; y normas utilizadas. A continuación, se presentan sucintamente los artículos, mientras que en el Anexo (Anexo del 1 al 6) se encuentran informaciones más detalladas.

**3.2.1. Resumen artículo N°1. (A. Bellini, L. Benedetti, L. Pozza, C. Mazzotti, 2020)**

Tabla 1 Tabla Resumen artículo 1

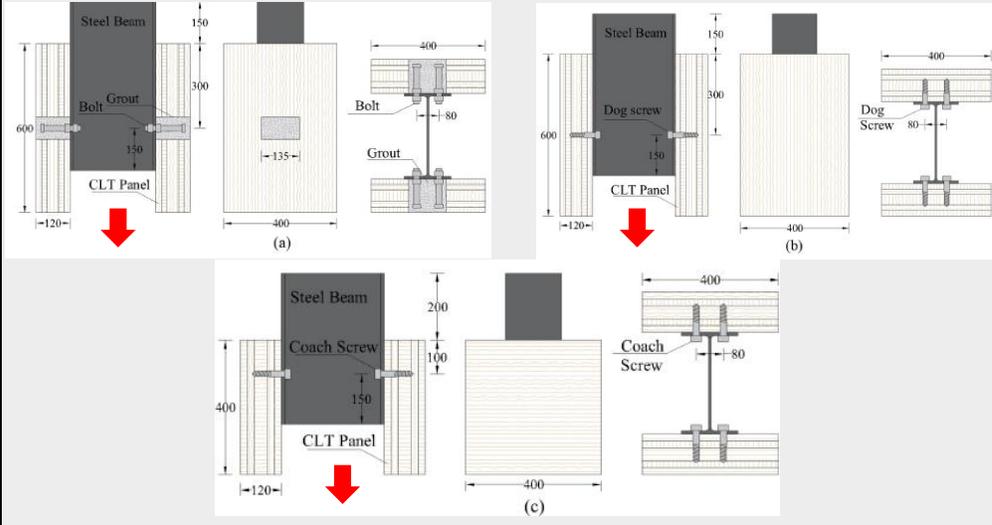
<b>Identificación</b>	<i>A. Bellini, L. Benedetti, L. Pozza, C. Mazzotti, “Experimental characterization of monotonic and cyclic behavior of steel-to-CLT nailed joints strengthened with composite plies”, Construction and Building Materials, 56 (2020) 119460.</i>
<b>Objetivo</b>	Investigar mediante ensayos experimentales monótonos y cíclicos, la eficacia para mejorar la capacidad de carga y la rigidez de las uniones de placas de acero clavadas a CLT.
<b>Materiales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Paneles CLT de 5 capas de madera C24 de 200 x 600 mm<sup>2</sup>.</li> <li>○ Placas de acero S275 de 100 x 450 mm<sup>2</sup></li> <li>○ Tornillos 4 x 60 mm</li> </ul> <p>La superficie del CLT se reforzó utilizando un tejido de carbono multiaxial, esta fue adherida al panel CLT por una resina epoxi.</p>
<b>Configuración y montaje</b>	<p>Montaje para ensayos monótonos y cíclicos: conexión (a) tornillos 4 x 60 mm; (b) tornillos 6 x 60 mm.</p> <p>El panel queda fijo y la carga es aplicada en la placa de acero (mostrado en la flecha de color rojo).</p> <div data-bbox="602 1178 1133 1583" style="text-align: center;"> <p>The diagrams illustrate the experimental setup for two types of steel-to-CLT joints. Both diagrams show a yellow CLT panel (310 mm long, 200 mm high) with a grey carbon fiber reinforcement strip (30 mm wide) applied to its right side. A white steel plate (260 mm long, 100 mm high) is attached to the right end of the CLT panel. A red arrow indicates the direction of the applied load on the steel plate. Diagram (a) shows a joint with 4x60 mm screws, and diagram (b) shows a joint with 6x60 mm screws. The steel plate is labeled 'Placa de acero' and the carbon fiber reinforcement is labeled 'Refuerzo'.</p> </div>

### Capítulo 3: Desarrollo de la solución de la problemática

<p><i>Resultados</i></p>	<p>Modos de fallo identificados: (a) Modo de fallo A (empotramiento); (b) Modo de fallo B (empotramiento reducido debido al refuerzo de compuesto); (c) Modo de fallo C (empotramiento con daño superficial); (d) Detalle del tornillo deformado plásticamente y desgarro de la madera en la dirección de la carga.</p> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: center; gap: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>(a)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(c)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(d)</p> </div> </div>
<p><i>Conclusiones</i></p>	<p>Existe un efecto beneficioso del sistema de refuerzo (tejido de carbono multiaxial) en el comportamiento de conexión, que obtiene una mayor capacidad de carga en las pruebas monótonas y cíclicas. También se ve una mejora por el refuerzo cuando la carga aplicada fue perpendicular a la fibra (<math>0^\circ</math>). El refuerzo es capaz de aumentar tanto la fuerza máxima como fuerza de tensión de la conexión y conduce a una reducción general del desplazamiento.</p> <p>El tipo de falla más notoria ocurre cuando no existe refuerzo, donde los tornillos logran deformarse, creando un desplazamiento entre el conector con el panel. Si se compara el tipo de dirección de la fibra al estar en <math>90^\circ</math> respecto a la sollicitación, disminuye la capacidad de carga respecto a la de <math>0^\circ</math>. Así mismo ocurre con el tipo de fijación al panel CLT, donde los 12 tornillos (4 x 60 mm) tienen menos capacidad de carga que los 8 tornillos (6 x 60 mm).</p>

3.2.2. Resumen artículo N°2. (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2017)

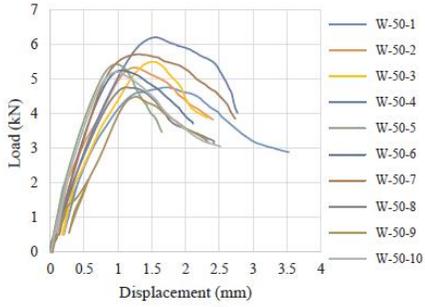
Tabla 2 Tabla Resumen artículo 2

<p>Identificación</p>	<p>A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, “Composite connections between CLT slab and steel beam: Experiments and empirical models” <i>Journal of Constructional Steel Research</i>, 138 (2017), pp. 823–836</p>
<p>Objetivo</p>	<p>Estudiar el comportamiento de la unión entre una losa de CLT (para suelo) y una viga de acero, mediante ensayos de “push-out”.</p>
<p>Materiales</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Paneles CLT de 5 capas de madera C24 de 400 x 600 mm<sup>2</sup> y 400 x 400 mm<sup>2</sup></li> <li>○ Perfil de acero laminado en caliente 310 UB 40.4</li> <li>○ Tornillos de cabeza hexagonal (CS), tornillos de cabeza hexagonal punta broca (DS) y pernos (incrustados en base de cemento, BGP).</li> </ul>
<p>Configuración y montaje</p>	<p><u>Montaje tornillos: (b) DS y (c) CS</u></p> <p>Los tornillos se conectaron con los perfiles de acero a los paneles CLT, con una distancia entre centros de 80 mm en ambos extremos.</p> <p><u>Montaje perno-cementada: (a) BGP</u></p> <p>Se cortó una sección rectangular de 135 x 60/80 mm en el panel para la conexión del perno y la cementada.</p> <p>El panel queda fijo y la carga es aplicada en la placa de acero (mostrado en la flecha de color rojo).</p> 

<p><i>Resultados</i></p>	<p><b><u>Conexiones con tornillos de cabeza hexagonal o Coach Screws (CS):</u></b> La dirección de la carga fue perpendicular a la fibra de la madera en las láminas exteriores del CLT. Se observó una zona de aplastamiento relativamente grande alrededor de las fijaciones, la cual se correlaciona directamente con el tamaño de los tornillos.</p> <div data-bbox="516 388 1377 630"> </div> <p><b><u>Conexiones con tornillos de cabeza hexagonal punta broca o Dog Screws (DS):</u></b> La dirección de la carga fue paralela a la fibra de la madera en las láminas exteriores del CLT. El tamaño de la zona de aplastamiento fue respecto a las probetas con tornillos CS. La deformación de los tornillos de 16 mm y 19 mm tuvo una única zona plástica.</p> <div data-bbox="483 871 1372 1123"> </div> <p><b><u>Conexiones con pernos incrustados en cementada o “Bolts embedded in the Grout Pocket” (BGP):</u></b> Estas uniones presentaron un modo de fallo mixto asociado al aplastamiento del CLT, agrietamiento y aplastamiento de la cementada, deformación plástica en los pernos, y flexión y deformación plástica en el ala de los perfiles de acero. No se observó ninguna evidencia de daño y/o deformación excesiva en la conexión BGP.</p> <div data-bbox="457 1375 1367 1648"> </div>
<p><i>Conclusiones</i></p>	<p>La rigidez y la resistencia de los conectores de pernos en la cavidad de la cementada es significativamente mayor que la de los tornillos CS y DS. La rigidez inicial de las uniones cargadas perpendicularmente a la fibra es menor que la rigidez inicial de las uniones cargadas paralelamente a la fibra.</p>

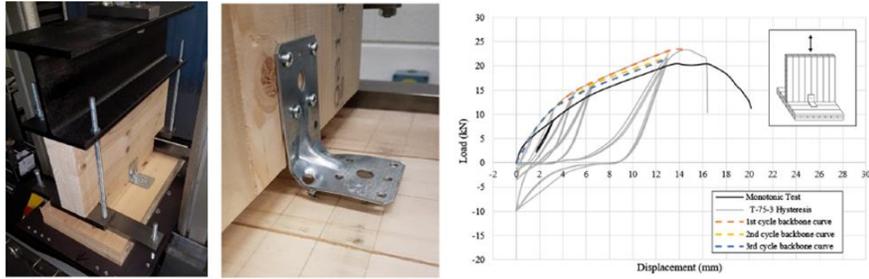
3.2.3. Resumen artículo N°. (C. O'Ceallaigh, A.M. Harte, 2019)

Tabla 3 Tabla Resumen paper 3

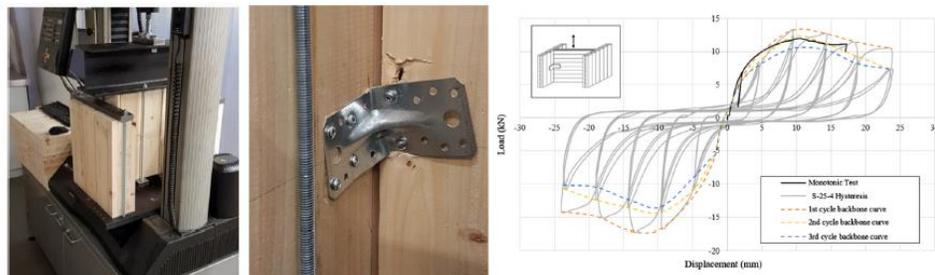
Identificación	<b>“Comportamiento elástico y dúctil de las uniones entre paredes y suelos de CLT e influencia de la longitud de las fijaciones”</b>
<i>Objetivo</i>	Analizar el comportamiento elástico y dúctil de la conexión de un ángulo de refuerzo en un panel CLT, bajo cargas monotónicas y cíclicas.
<i>Materiales</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Paneles CLT de 5 y 3 capas de madera grado C16</li> <li>○ Tornillos de 5 mm de diámetro de longitud de 25 mm, 50 mm y 75 mm.</li> <li>○ Ángulos de refuerzo fijados con cuatro tornillos en la cara horizontal y cuatro tornillos en la cara vertical</li> </ul>
<i>Configuración y montaje</i>	<p><b>Pruebas monótonas de tensión y corte en elementos de fijación individuales:</b> Se atornillaron en paneles de CLT perpendiculares al plano para examinar la influencia de la longitud del tornillo.</p> <p><b>Pruebas de conexión cíclica, en tensión y corte, entre la pared y el suelo:</b> La conexión se formó utilizando cuatro tornillos LBS de 5 mm de diámetro en las caras vertical y horizontal, variando únicamente la longitud del tornillo.</p>
<i>Resultados</i>	<p><b>Ensayo de tensión de los tornillos (monótono):</b> Todas las muestras fallaron por la retirada del tornillo del panel CLT, independientemente de la longitud de este. El comportamiento carga-desplazamiento fue lineal hasta la fluencia. Luego, la carga sigue aumentando hasta que se alcanza la carga máxima, seguida de una disminución de la carga hasta el fallo final.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p><b>Ensayo de corte de los tornillos (monótono):</b> Para los tornillos de 50 mm y 75 mm de longitud el modo de falla es de empotramiento y fluencia del tornillo (imagen izquierda). En los de 25 mm de longitud el tornillo no presenta deformación plástica (imagen derecha).</p> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 50px; margin: 10px 0;">   </div> <p>Los resultados experimentales muestran un aumento de la carga máxima con la longitud del tornillo, independientemente de la orientación de la fibra. Los valores medios de ductilidad</p>

son generalmente más bajos para los tornillos cargados perpendicular a la fibra, además la ductilidad resultó ser mayor para los tornillos cargados en corte que en tensión

**Ensayo de tensión de conexiones (cíclico):** Todas las pruebas demostraron falla en los tornillos en el lado del suelo de la conexión debido al desplazamiento vertical del panel. La falla se produjo por la retirada del tornillo del panel o por el desgarro de la cabeza del tornillo, o por una combinación de retirada y flexión de este. No parece existir influencia de la longitud del elemento de fijación.



**Ensayo de corte de conexiones (cíclico):** En las muestras de conexión cortante se observó la deformación del soporte de acero en el lado del suelo y de la pared de cada conexión. Se produjo, debido al pandeo local, un fallo del soporte y del tornillo. Para los tornillos de 25 mm de longitud, el fallo se debió al empotramiento y a la retirada. Para los tornillos de 50 mm y 75 mm de longitud, se observó un fallo por flexión, por empotramiento y por retirada. La carga media máxima de falla en corte aumenta con el incremento de la longitud del tornillo. La rigidez elástica fue similar para todas las longitudes de los elementos de fijación. El factor medio de degradación de la resistencia se mantiene relativamente constante independientemente de la longitud del tornillo.



*Conclusiones*

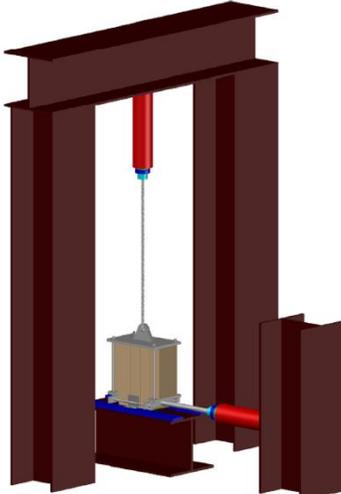
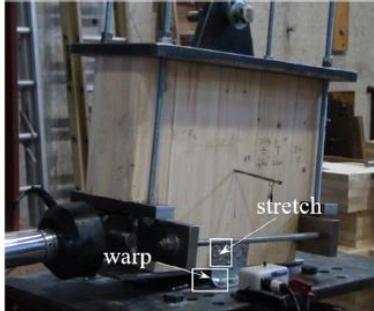
En el caso de los elementos de fijación individuales, se observó una tendencia al aumento de la carga (máxima, fluencia y rotura) con el incremento de la longitud del tornillo.

En los ensayos de corte de elementos de fijación individual, se obtienen mejores resultados de capacidad de carga si las fijaciones están perpendiculares a la fibra del panel CLT.

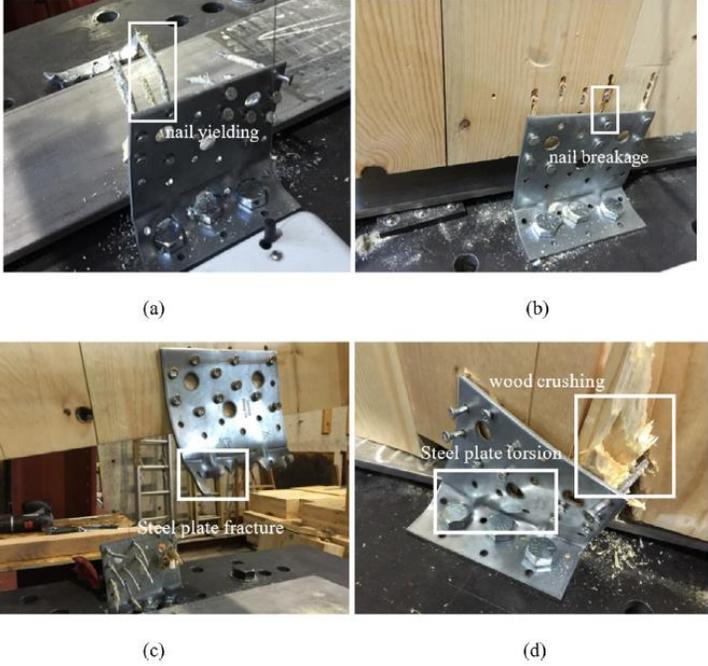
Se observa que los índices de falla siguen siendo para la dirección de la fibra, en este caso en paralelo la conexión de las fijaciones con el panel CLT.

3.2.4. Resumen artículo N°4. (J. Liu, F. Lam, 2018)

Tabla 4 Tabla Resumen paper 4

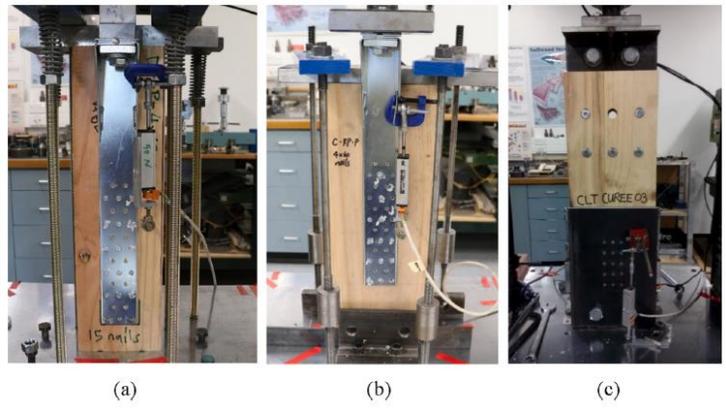
<p>Identificación</p>	<p><b>Jingjing Liu, Frank Lam, “Experimental test of coupling effect on CLT angle bracket connections”, Engineering Structures 171 (2018), pp. 862–873</b></p>	
<p>Objetivo</p>	<p>Investigar el efecto de acoplamiento de las cargas axiales y laterales de las uniones de ángulos de refuerzos con paneles CLT. Se realizaron ensayos monótonos y cíclicos de las uniones cortantes</p>	
<p>Materiales</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Paneles CLT de madera SPF clasificada n° 1/2 de 5 capas de 450 x 600 mm<sup>2</sup>.</li> <li>○ Ángulos de refuerzo.</li> <li>○ Tornillos de 4 x 60 mm.</li> <li>○ Pernos de 12mm de diámetro (grado 8.8).</li> </ul>	
<p>Configuración y montaje</p>	<p>Primero se aplicó una carga de tensión que se mantuvo constante y posteriormente se aplicó un desplazamiento lateral.</p> <p>Para evaluar el efecto de la carga de tensión en el comportamiento de corte de los ángulos de refuerzo, se ensayaron las conexiones de los soportes bajo 4 niveles de carga de tensión en el plano (0 kN, 20 kN, 30 kN y 40 kN)</p>	
<p>Resultados</p>	<p>Sin carga de tensión, la principal deformación se produjo en la interacción entre los tornillos y la madera. Al aumentar la carga de tensión, la placa de acero conectada al panel se estiró significativamente en la esquina. Los lados exteriores no pueden moverse horizontalmente, sino que se inclinan hacia arriba debido a la fuerza de levantamiento. Mientras tanto, la mayor carga axial coexistente conduce a un estiramiento más severo de la parte superior de la placa de acero.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>	

### Capítulo 3: Desarrollo de la solución de la problemática

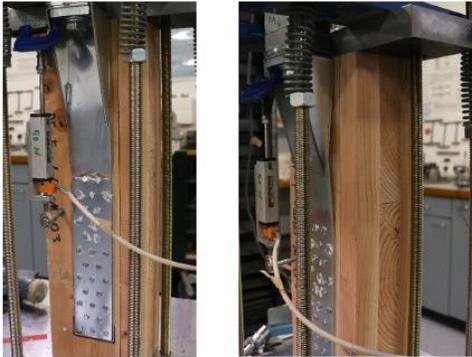
	<p>Para los niveles de carga vertical de 0 kN y 20 kN (cíclicos) la mayoría de los especímenes fallaron debido a la cesión de los tornillos conectados a la madera (a). Cuando se aplicó una carga vertical mayor, se produjeron fallos como la rotura de los tornillos por corte (b), la fractura de la placa de acero (c) y el aplastamiento localizado de la madera (d).</p> <div data-bbox="581 384 1289 1050"><p>(a) (b)</p><p>(c) (d)</p></div>
<p><i>Conclusiones</i></p>	<p>Se llevó a cabo un programa de ensayos para estudiar el efecto de acoplamiento de la carga de corte y la carga de tracción para las conexiones típicas de CLT con soportes angulares. Se analizó el modo de fallo y la curva carga-desplazamiento.</p> <p>Los resultados muestran que el comportamiento cortante y de tracción de los ángulos de refuerzos están fuertemente acoplados. La carga de tensión coexistente debilitó el comportamiento cortante de los conectores (resistencia, disipación de energía y estabilidad).</p> <p>La carga de tensión coexistente debilitó la resistencia al corte, ya que también presionó los tornillos a la madera empotrada. Los tornillos pueden soportar más corte, sin embargo, la carga axial coexistente disminuyó la capacidad de disipación de energía.</p>

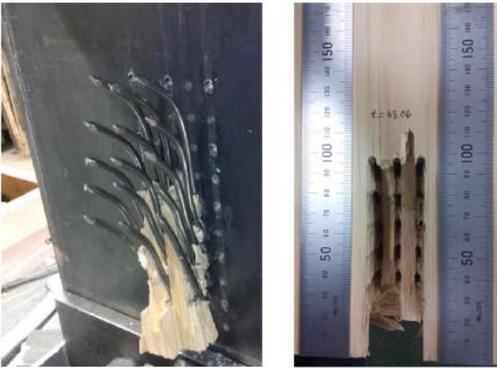
3.2.5. Resumen artículo N°5. (W. Dong, M. Li, L.M. Ottenhaus, H. Lim, 2020)

Tabla 5 Tabla Resumen paper 5

Identificación	<b>Wenchen Dong, Minghao Li, Lisa-Mareike Ottenhaus, Hyungsuk Lim, “Ductility and overstrength of nailed CLT hold-down connections”, Engineering Structures 215 (2020), pp. 110667</b>
<i>Objetivo</i>	Investigar el comportamiento estructural de los sistemas de conexión vertical “Hold-Down” en muros de CLT, bajo cargas monótonas y cíclicas.
<i>Materiales</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Paneles CLT de 3 y 5 capas de abeto “Douglas-fir” (DF) y pino radiata (RP), grado SG8.</li> <li>○ Soporte tipo WHT440</li> <li>○ Chapa de acero grado 300</li> <li>○ Clavos roscados de 4 × 50, 4 × 60, 4 × 100</li> </ul>
<i>Configuración y montaje</i>	<p><b><u>Conexiones de sujeción de tipo A (a):</u></b> Los soportes WHT440 se montaron sobre un panel CLT de 3 capas, utilizando clavos de 4 × 50 o 4 × 60.</p> <p><b><u>Conexiones de sujeción de tipo B (b):</u></b> Los soportes WHT440 se instalaron sobre un panel CLT de 3 capas, utilizando 15 clavos de 4 × 50 o 4 × 60.</p> <p><b><u>Conexiones de sujeción de tipo C (c):</u></b> Se instalaron placas laterales de acero de 10 mm de grosor con agujeros pretaladrados de 5 mm de diámetro sobre CLT RP de 5 capas utilizando 15 clavos de 4 × 100</p> <div style="text-align: center;">  <p>(a) (b) (c)</p> </div>

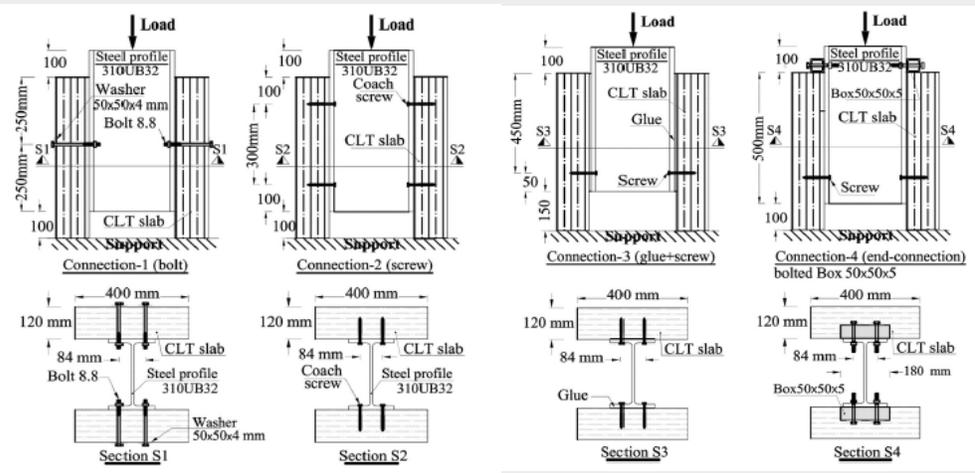
### Capítulo 3: Desarrollo de la solución de la problemática

<p><i>Resultados</i></p>	<p>La falla dominante de las conexiones A con patrón de clavado completo fue la fractura del soporte (imagen izquierda), generalmente en las filas de clavos superiores. Debido a la excentricidad de la carga, los soportes se deformaron fuera del plano (imagen derecha).</p>  <p>Las uniones A y tipo B con los patrones de clavado parcial fallaron debido a la retirada de los clavos y al corte de la cabeza de los clavos (imagen izquierda) por la flexión del soporte (imagen derecha). El rendimiento de la conexión de sujeción se rigió por el comportamiento estructural de los clavos.</p>  <p>En las uniones C con una amplia separación entre clavos, las fallas típicas fueron el corte de la cabeza del clavo (imagen izquierda) y el aplastamiento de la madera (imagen derecha). Dado que el tamaño de los clavos y la longitud de empotramiento de los clavos era suficiente, no era fácil la retirada de los clavos. El modo de fallo dominado fue el corte de la cabeza del clavo después de que los clavos se doblaran significativamente.</p>
--------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	 <p>Las uniones de tipo C con una separación estrecha entre los clavos fallaron normalmente debido a la cesión de los clavos (imagen izquierda) y al desgarramiento del grupo (imagen derecha). A medida que se reducía la distancia entre clavos, se desencadenaba el fallo por corte de la madera a lo largo de la dirección de carga.</p> 
<p><i>Conclusiones</i></p>	<p>Las dos longitudes de clavos provocaron una resistencia a la fluencia y una ductilidad similares. Los resultados de los ensayos indicaron que el efecto de las especies en el rendimiento de la conexión se hacía más evidente a medida que aumentaba la longitud de los clavos.</p> <p>En el caso de las uniones de sujeción de tipo C, la ductilidad de los ensayos monótono fue similar a la obtenida de los ensayos cíclicos. Sin embargo, para las uniones de sujeción de tipo A y B la ductilidad cíclica media fue superior a la ductilidad monótonica en un rango. El límite elástico medio de sujeción de los ensayos monótonos fue similar al obtenido en los ensayos cíclicos.</p>

3.2.6. Resumen artículo N°6. (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2016)

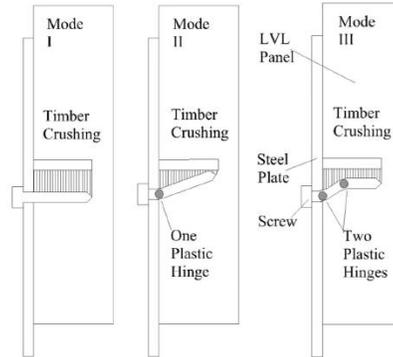
Tabla 6 Tabla Resumen paper 6

<p>Identificación</p>	<p>A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, “Load-slip behaviour of steel-cross laminated timber (CLT) composite connections”, <i>Journal of Constructional Steel Research</i>, 122 (2016), pp. 110-121</p>
<p>Objetivo</p>	<p>Estudiar la unión entre un panel CLT y una viga de acero mediante ensayos de “push-out”.</p>
<p>Materiales</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Paneles CLT de madera C24 de 5 capas de 400 x 600 mm<sup>2</sup></li> <li>○ Perfiles laminados en caliente de sección “I”</li> <li>○ Pernos de alta resistencia de grado 8.8 con diámetros de 12 mm y 16 mm.</li> <li>○ Tornillos hexagonales con diámetros de 12 mm, 16 mm y 20 mm.</li> <li>○ Placas de refuerzo</li> </ul>
<p>Configuración y montaje</p>	<p>Los paneles de CLT y los perfiles de acero se perforaron previamente. En las uniones atornilladas, se utilizó una arandela de 50 mm × 50 mm para evitar el aplastamiento del CLT en la dirección perpendicular al plano de las láminas de madera.</p> <p>Para la conexión se diseñó en los dos extremos de las vigas compuestas simplemente apoyadas una lámina de acero de 50 × 50 × 5 mm conectado al ala de la viga de acero mediante dos pernos de alta resistencia de grado 8.8 con agarre por fricción.</p> 

### Capítulo 3: Desarrollo de la solución de la problemática

*Resultados*

Las fallas en las fijaciones pueden clasificarse en 4 categorías, modos I, II, III y IV. En el I, sólo se produce el aplastamiento de la madera, sin ninguna deformación plástica en los elementos de fijación. En los modos II y III se producen una y dos deformaciones plásticas en los elementos de fijación, respectivamente. Además, puede producirse un aplastamiento parcial de la madera alrededor de los conectores. Para el modo IV se asocia a la fractura de los conectores y aplastamiento en la madera.

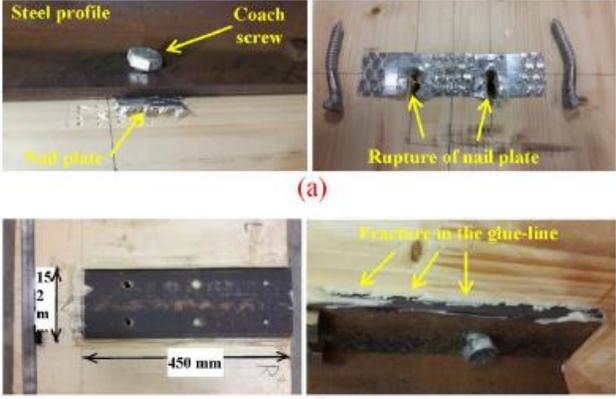


El modo de fallo dominante de las uniones compuestas de acero-CLT con tornillos de 12 mm (sin placa de refuerzo) fue el modo III, mientras que para tornillos de 16 mm y 20 mm (sin placa de refuerzo) fue el modo II. En las uniones compuestas de acero-CLT con pernos (incluyendo el con conexiones de láminas de acero de  $50 \times 50 \times 5$  mm), el modo de fallo IV fue el modo dominante.



El uso de placas de refuerzo no alteró el modo de falla de las uniones con tornillos, pero redujeron ligeramente la ductilidad de las uniones. Este modo se asoció a la rotura de la placa, al aplastamiento localizado de la madera y la formación de una o dos deformaciones plásticas en los tornillos, dependiendo del diámetro de estos (figura superior). Las uniones

Capítulo 3: Desarrollo de la solución de la problemática

	<p>con tornillos y pegamento produjeron un modo de fallo repentino que se asoció con la fractura de los tornillos o del pegamento y la separación de los paneles CLT del perfil de acero (figura inferior).</p> <div style="text-align: center;">  <p>(a)</p> <p>(b)</p> </div>
<p><i>Conclusiones</i></p>	<p>La respuesta carga-deslizamiento de las uniones atornilladas demostró un comportamiento dúctil, produciéndose después de un largo tramo post-pick. El aplastamiento local de la madera y el desarrollo de deformaciones plásticas en los tornillos provocan la falla. Las uniones atornilladas muestran una respuesta dúctil y la falla está asociada a la ruptura y a la caída repentina de la respuesta de deslizamiento de la carga.</p> <p>Las uniones con pegamento son mucho más rígidas y resistentes que las uniones de tornillos y pernos, pero presentan un fallo frágil que no es deseable. El uso de conexiones con pegamento junto con los tornillos conduce a un comportamiento más dúctil de la conexión.</p> <p>La conexión con pernos y la lámina de acero, demostró una rigidez y resistencia considerablemente mayores. Esta conexión puede utilizarse en vigas/suelos en los que se aplique un momento flector positivo sobre estos elementos. Las conexiones de tornillos y placas de refuerzo aumentan la rigidez y la resistencia inicial de las conexiones.</p>

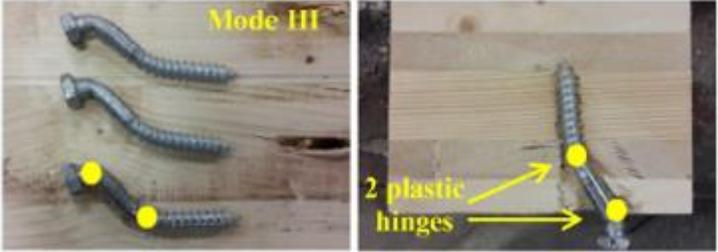
### **3.3. SELECCIÓN DE FALLA**

En base al análisis de fallas del material bibliográfico revisado, se selecciona el tipo de unión a simular por elementos finitos. Para esta selección se tomarán en cuenta los tipos de conectores que tengan más fallas, sea por corte y/o por deformación, y el tipo de ensayo donde se puedan observar de mejor manera estas fallas y donde ocurren.

Cabe destacar que la dirección de la carga y la dirección de la fibra de la madera influyen directamente en el tipo de falla. Estas ocurren antes cuando la dirección de la carga es paralela a la dirección de la fibra de la madera y el daño en el panel CLT es mucho más visible. Se tomarán en cuenta ambas direcciones para visualizar las diferencias entre ellas.

La falla más recurrente en los conectores es por deformaciones plásticas, tanto para pernos como para tornillos. Se encuentran mayores deformaciones en los conectores tipo tornillo, teniendo hasta 2 deformaciones plásticas. En la tabla 7 se aprecian los fallos en tornillos M12, donde se pueden apreciar las deformaciones plásticas y el desgarramiento de los paneles CLT. Este conector es el que entrega los resultados con más fallas y con menos capacidad de carga.

Tabla 7 Tabla comparativa deformaciones plásticas en tornillos

Artículo	Deformaciones plásticas en tornillos
<p>Nº 6 (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2016)</p>	
<p>Nº2 (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2017)</p>	
<p>Nº1 (A. Bellini, , L. Benedetti, L. Pozza, C. Mazzotti, 2020)</p>	

El tipo de unión que evalúa de mejor forma y con mejores resultados visibles para los conectores seleccionados anteriormente son por medio de la unión viga-CLT. Uno de los ensayos donde se pueden analizar de mejor forma las fallas es en el ensayo “push-out”. Este ensayo aplica una carga en dirección perpendicular a la del conector, haciendo un efecto de corte en él. Los resultados importantes obtenidos de este ensayo son de carga-deslizamiento, la carga máxima que soporta el conector y el análisis de la curva esfuerzo – deformación. Se compararán los resultados de los conectores seleccionados de acuerdo con los gráficos obtenidos por la simulación.

### Capítulo 3: Desarrollo de la solución de la problemática

Los materiales seleccionados para realizar las simulaciones son los siguientes: (Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados se encuentran en el Anexo 7, 8 y 9)

- Panel de CLT de 3 capas de dimensiones de 400 mm x 400 mm, con un espesor de 20 mm y en el centro un espesor de 40 mm. La configuración del panel estará basada por la norma AS/NZS2098.1 (AS/NZS 2098.1, 2016).
- Viga de acero laminado en caliente 310 UB 40.4. La configuración de la viga estará basada por la norma AS/NZS 3679.1 (AS/NZS 3679.1, 2010).
- Tornillos de cabeza hexagonal de 12 mm y 16 mm de diámetro, de acero grado 4.6. Para esta simulación se utilizarán 2 tornillos.
- Perno de cabeza hexagonal de 12 mm de diámetro, de acero de alta resistencia grado 8.8. Para esta simulación se utilizarán 2 pernos.
- Tuerca hexagonal de 12 mm de diámetro de acero de alta resistencia grado 8.8. Para esta simulación se utilizarán 2 tuercas.

### **3.4. METODOLOGIA PARA LA SIMULACIÓN**

Para este punto se deben seguir los siguientes pasos de modelado para obtener los resultados esperados descritos en el capítulo de introducción: diseño de partes; configuración de montaje; propiedades de materiales; condiciones de borde; tipos de contactos; mallado y resultados.

Se analizarán los comportamientos de los conectores, considerando las deformaciones y esfuerzos en los conectores, así como los desplazamientos y carga en la parte superior de la viga.

#### **3.4.1. Alcances**

- Para el diseño 3D se minimizan los elementos de cada pieza.
- Las capas de los paneles CLT se dejarán como contacto “bonded”, por lo tanto, el pegamento que une las capas no se considera en la simulación.
- Se considerará la simetría del modelo para reducir el costo computacional, por lo tanto, se dibuja la mitad de la configuración designada.
- La madera será modelada como un material ortotrópico con comportamiento no lineal. Esta no considera el daño (daño no real).
- La comparativa de los resultados obtenidos es de forma cualitativa.

#### **3.4.2. Modelo 3D**

El modelo de las piezas fue creado en Inventor Autodesk y se ensamblaron utilizando la herramienta de Ansys, Space Claim. La Tabla 8 resume la geometría de las tres configuraciones estudiadas, mientras que la Tabla 9 detalla los componentes de cada una.

Tabla 8 Vista frontal y lateral de las 3 configuraciones

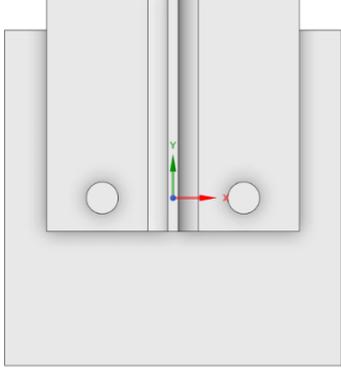
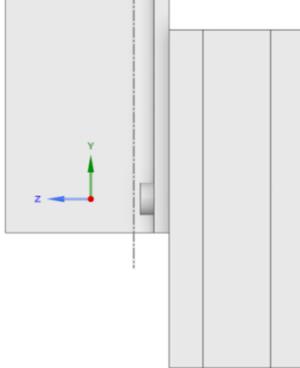
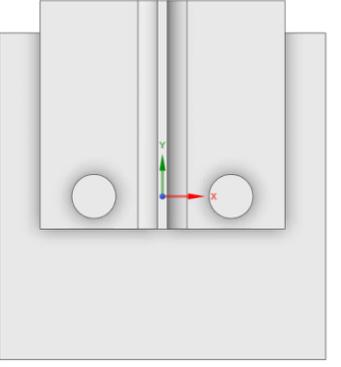
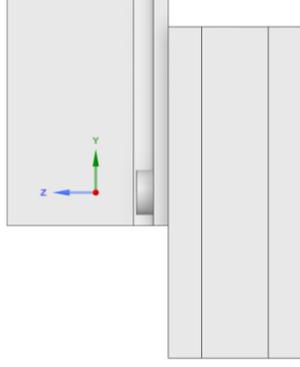
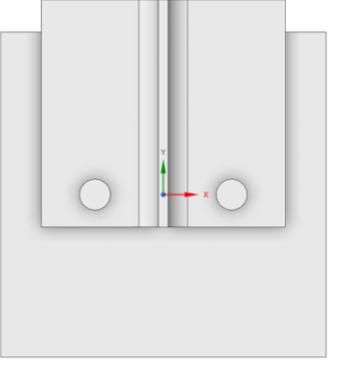
Conexión viga-panel CLT utilizando 2 tornillos M12x80 (Configuración M12x80)	
 <p>Vista frontal</p>	 <p>Vista lateral</p>
Conexión viga-panel CLT utilizando 2 tornillos M16x80 (Configuración M16x80)	
 <p>Vista frontal</p>	 <p>Vista lateral</p>
Conexión viga-panel CLT utilizando 2 pernos M12x100 (Configuración M12x100)	
 <p>Vista frontal</p>	 <p>Vista lateral</p>

Tabla 9 Partes para las 3 configuraciones

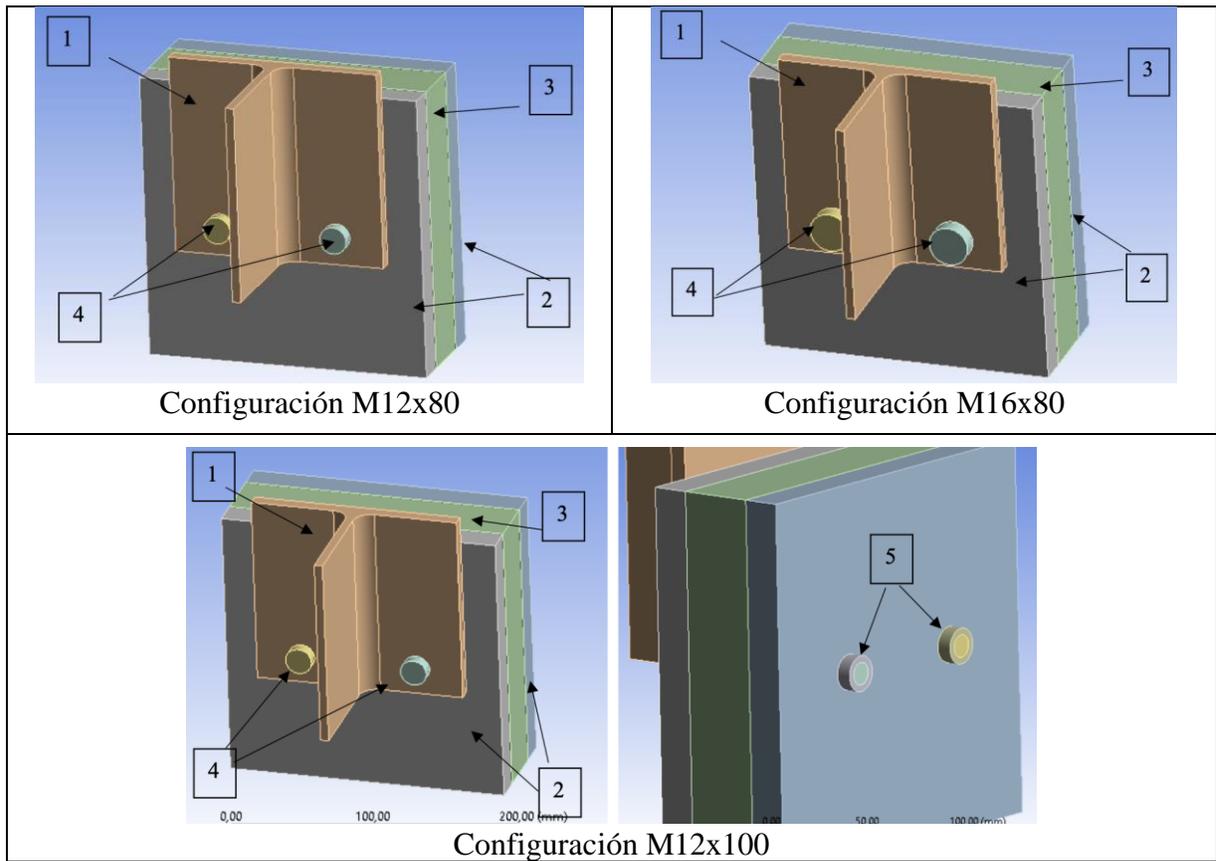


Tabla 10 Elementos para modelo 3D usando tornillos M12

Numero	Elementos
1	1 Viga de acero
2	2 Paneles CLT de 150x150x20 mm
3	1 Panel CLT de 150x150x40 mm
4	2 Tornillos M12x80

### Capítulo 3: Desarrollo de la solución de la problemática

Tabla 11 Elementos para modelo 3D usando tornillos M16

Numero	Elementos
1	1 Viga de acero
2	2 Paneles CLT de 150x150x20 mm
3	1 Panel CLT de 150x150x40 mm
4	2 Tornillos M16x80

Tabla 12 Elementos para modelo 3D usando perno M12

Numero	Elementos
1	1 Viga de acero
2	2 Paneles CLT de 150x150x20 mm
3	1 Panel CLT de 150x150x40 mm
4	2 Pernos M12x100
5	2 Tuercas

### 3.4.3. Mallado

El mallado para todos los modelos a simular fue por “default”, logrando una cantidad considerable de números de elementos en la estructura seleccionada. Se realiza un refinamiento de malla solo en los conectores con tal de darles más elementos. También se considera el refinamiento de malla para las tuercas en el modelo de pernos M16 (ver Ilustración 3.1).

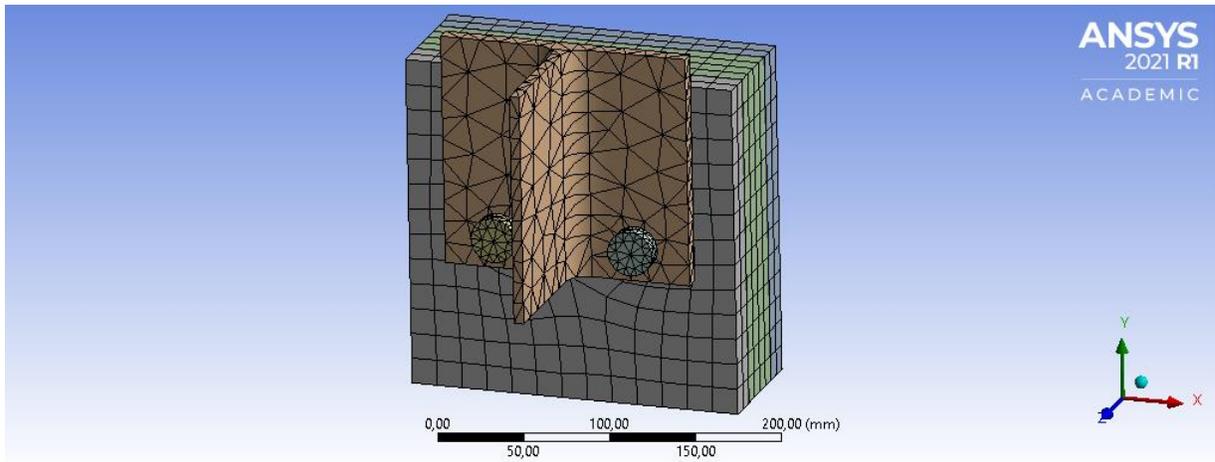


Ilustración 3.1 Mallado y refinamiento en estructura 3D

En la tabla 13 se encuentra la cantidad de elementos y nodos para tornillos y pernos fueron los siguientes

Tabla 13 Elementos y nodos para cada configuración

Configuración	Elementos	Nodos
<b>Tornillo M12</b>	14392	4001
<b>Tornillo M16</b>	13569	3708
<b>Perno M12</b>	17665	5492

### 3.4.4. Condiciones de borde

Las condiciones de borde se esquematizan en la Ilustración 3.2 y 3.3, se detallan según:

- Fixed Support: Soporte fijo en la parte inferior de los paneles de CLT
- Displacement: Desplazamiento de la viga en el eje Y en dirección negativa al eje de coordenadas que se encuentra en el programa. Los valores de desplazamiento dependen de la capacidad que soportan los conectores (ruptura).
- Bolt Pretension: La pretensión de pernos solo fue usada para la Configuración M12x100

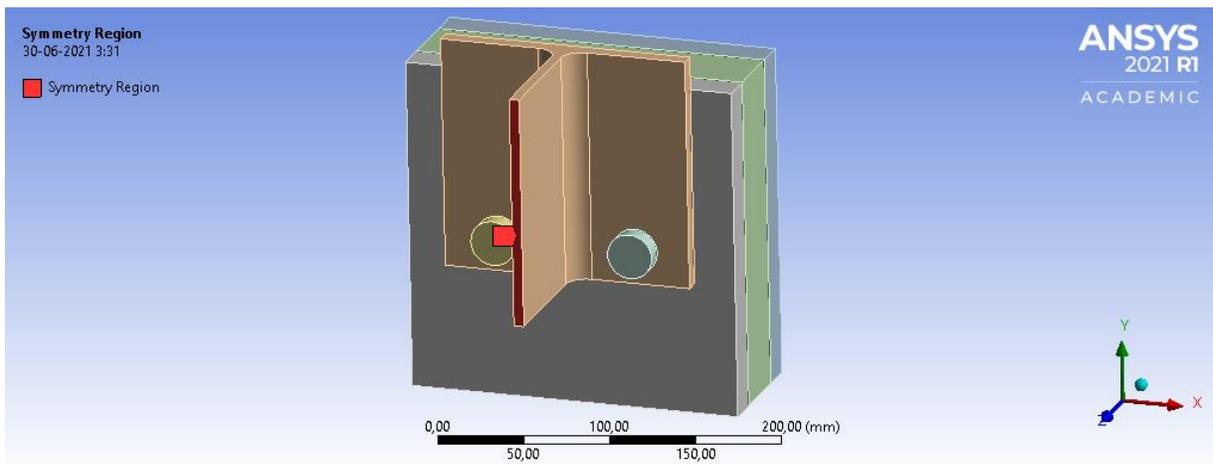


Ilustración 3.2 Simetría en sección viga I

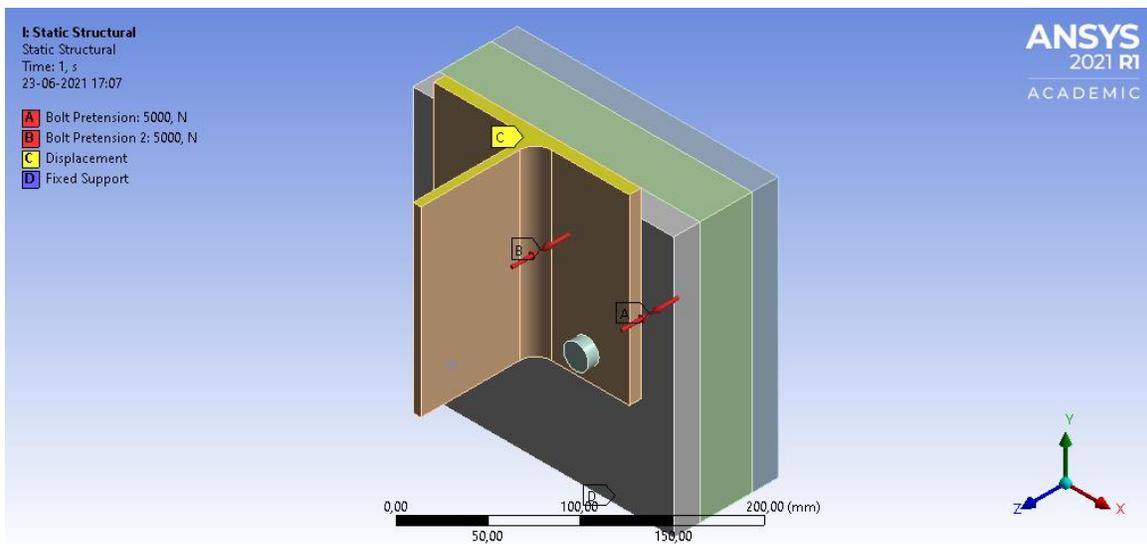


Ilustración 3.3 Condiciones de borde para 2 pernos M12

### Capítulo 3: Desarrollo de la solución de la problemática

A las condiciones de borde anteriormente descritas se agregaron condiciones de contacto que se detallan según los tipos de conectores. A continuación, se presentan en las tablas 14 y 15 los tipos de contactos entre las partes.

Tabla 14 Contactos tornillos

<b><i>Tipo de contacto</i></b>	<b>Partes con contacto</b>
<i>Frictional</i>	Tornillos - Paneles CLT
	Tornillos - Viga
<i>Frictionless</i>	Viga - Panel CLT
<i>Bonded</i>	Panel CLT – Panel CLT
	Tornillo (extremo) – Panel CLT

Tabla 15 Contactos pernos

<b><i>Tipo de contacto</i></b>	<b>Partes con contacto</b>
<i>Frictional (0.15)</i>	Tornillos - Paneles CLT
	Tornillos - Viga
<i>Frictionless</i>	Viga - Panel CLT
<i>Bonded</i>	Panel CLT - Panel CLT
	Tuerca – Tornillo
	Tuerca – Panel CLT

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## Capítulo 4. Análisis de resultados

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos de las simulaciones del software ANSYS para los conectores de tornillos M12 M16 y pernos M12. Se compara la carga máxima que soportan los conectores y el esfuerzo de fluencia. También se comparan algunos resultados de los ensayos estudiados en la Sección 3.1. Se muestra la influencia de la dirección de la fibra de los paneles CLT respecto a la carga aplicada.

### **4.1. RESULTADOS GRAFICOS**

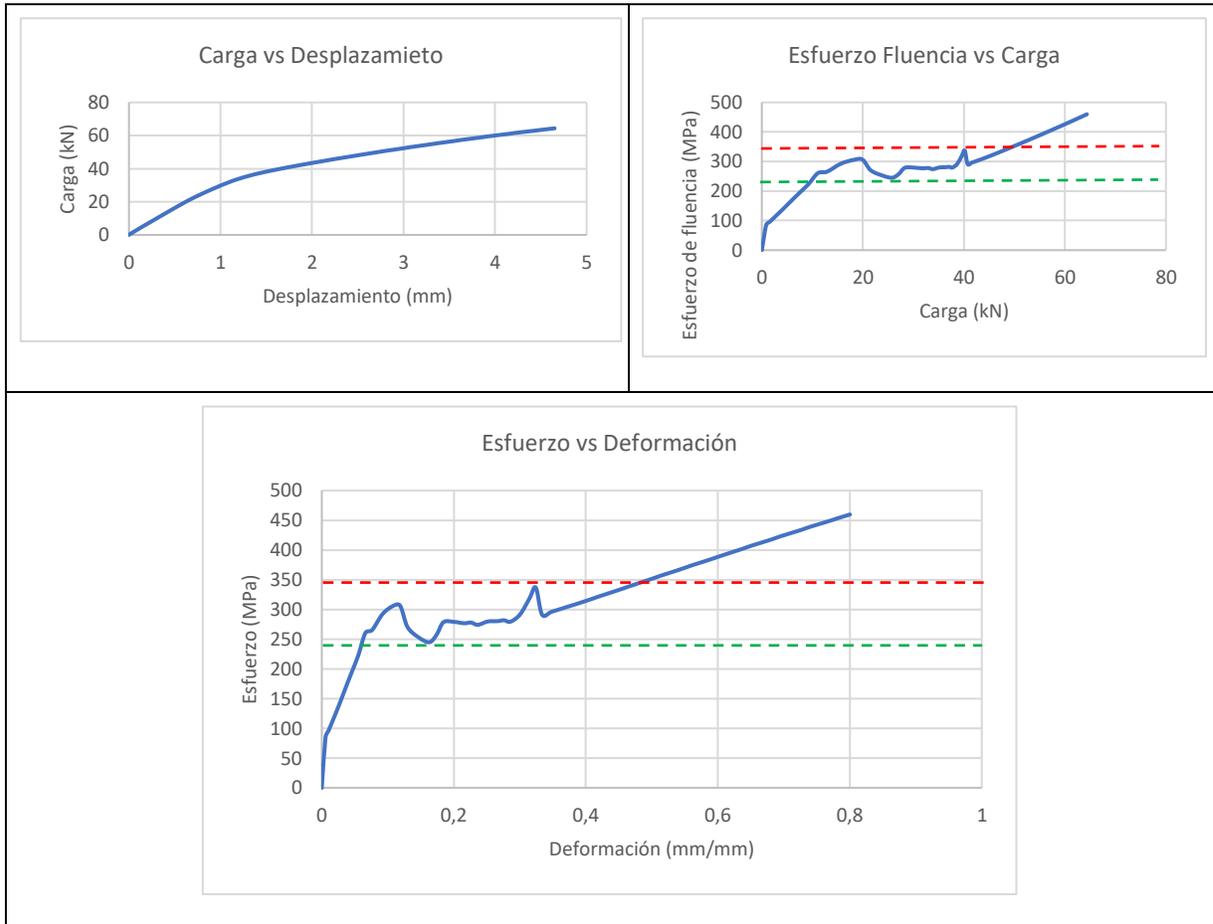
Se presentan los resultados de las simulaciones, luego de ser post-procesados en Excel. Para cada conector se realiza una tabla comparativa con los valores de carga, esfuerzo y deformación en relación con la dirección de la fibra de la madera, en total se realizan seis gráficos para cada tipo de conector. Los valores obtenidos se comparan con los resultados de los ensayos 2 y 6 (capítulo 3.1).

En los gráficos de esfuerzo de fluencia vs carga y esfuerzo de fluencia vs deformación se encuentran dos líneas cortadas que definen el límite elástico (verde) y el esfuerzo máximo de fluencia (rojo).

## Capítulo 4. Análisis de resultados

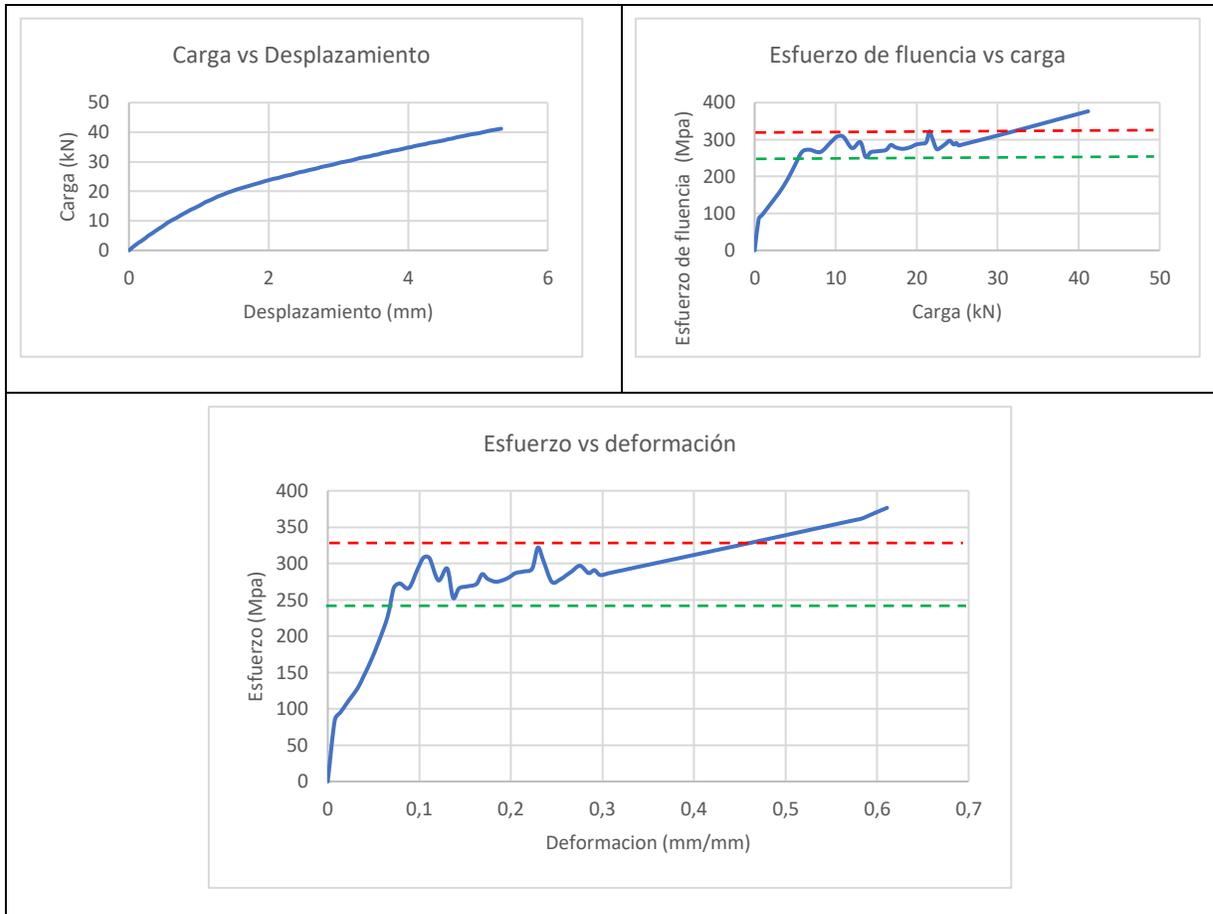
### 4.1.1. Configuración tornillo M12x80

#### 4.1.1.1. Resultados considerando la fibra del CLT perpendicular a la dirección de la carga



## Capítulo 4. Análisis de resultados

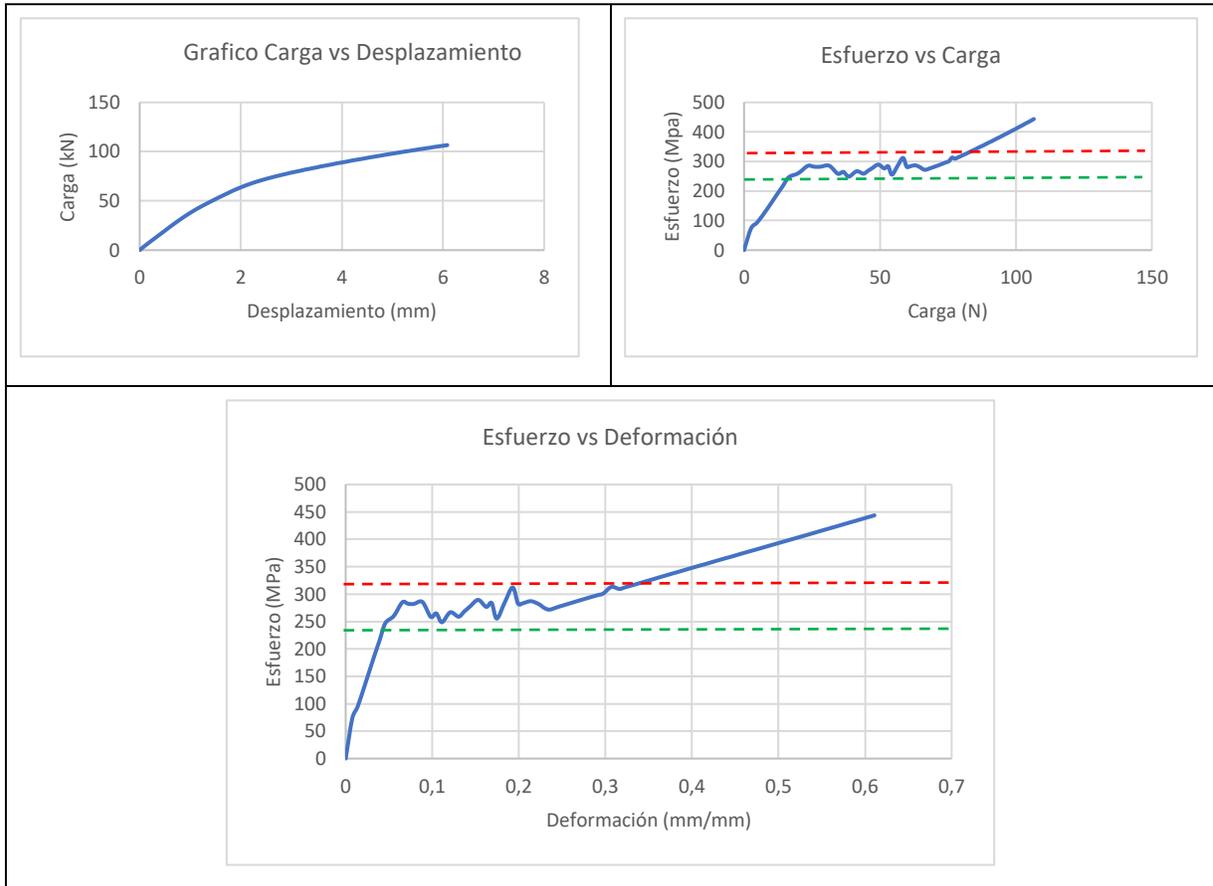
### 4.1.1.2. Resultados considerando la fibra del CLT paralela a la dirección de la carga



## Capítulo 4. Análisis de resultados

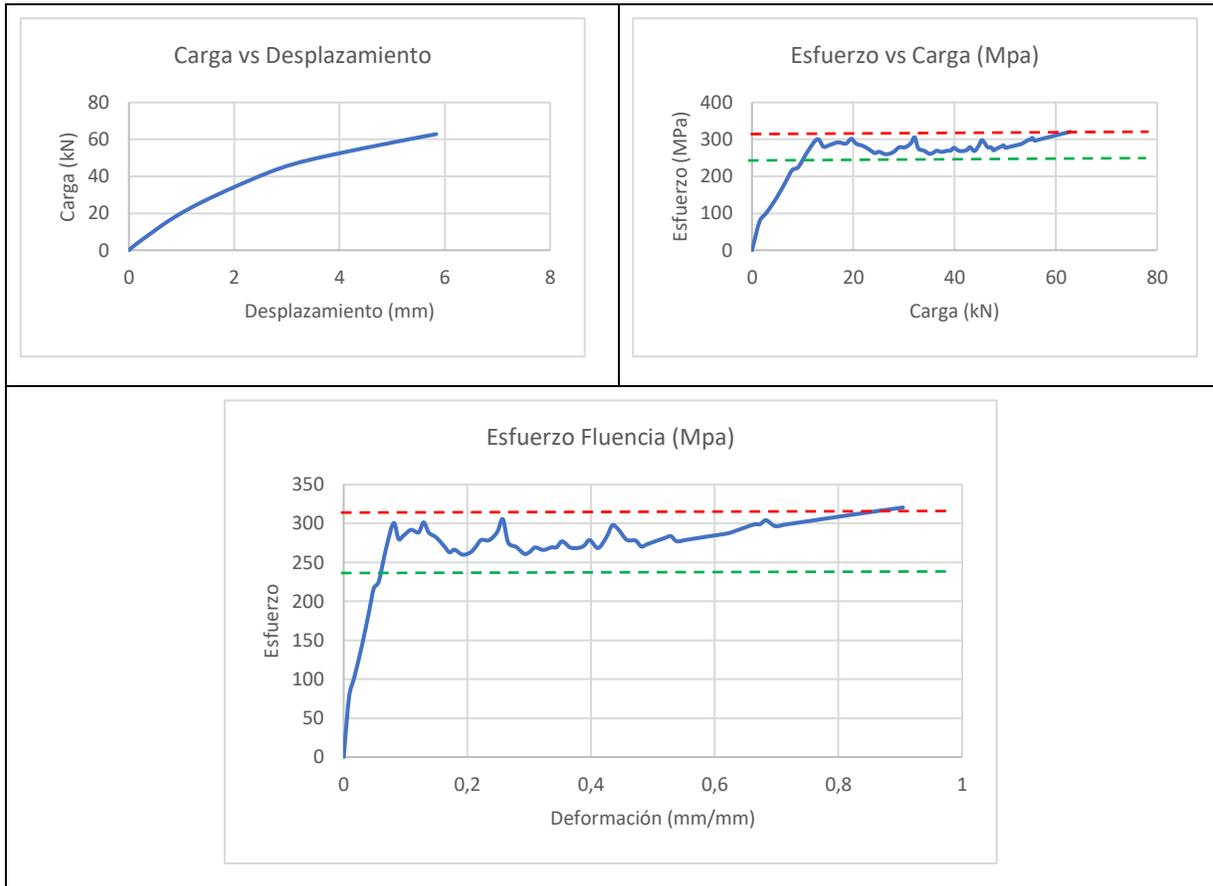
### 4.1.2. Configuración tornillo M16x80

#### 4.1.2.1. Resultados considerando la fibra del CLT perpendicular a la dirección de la carga



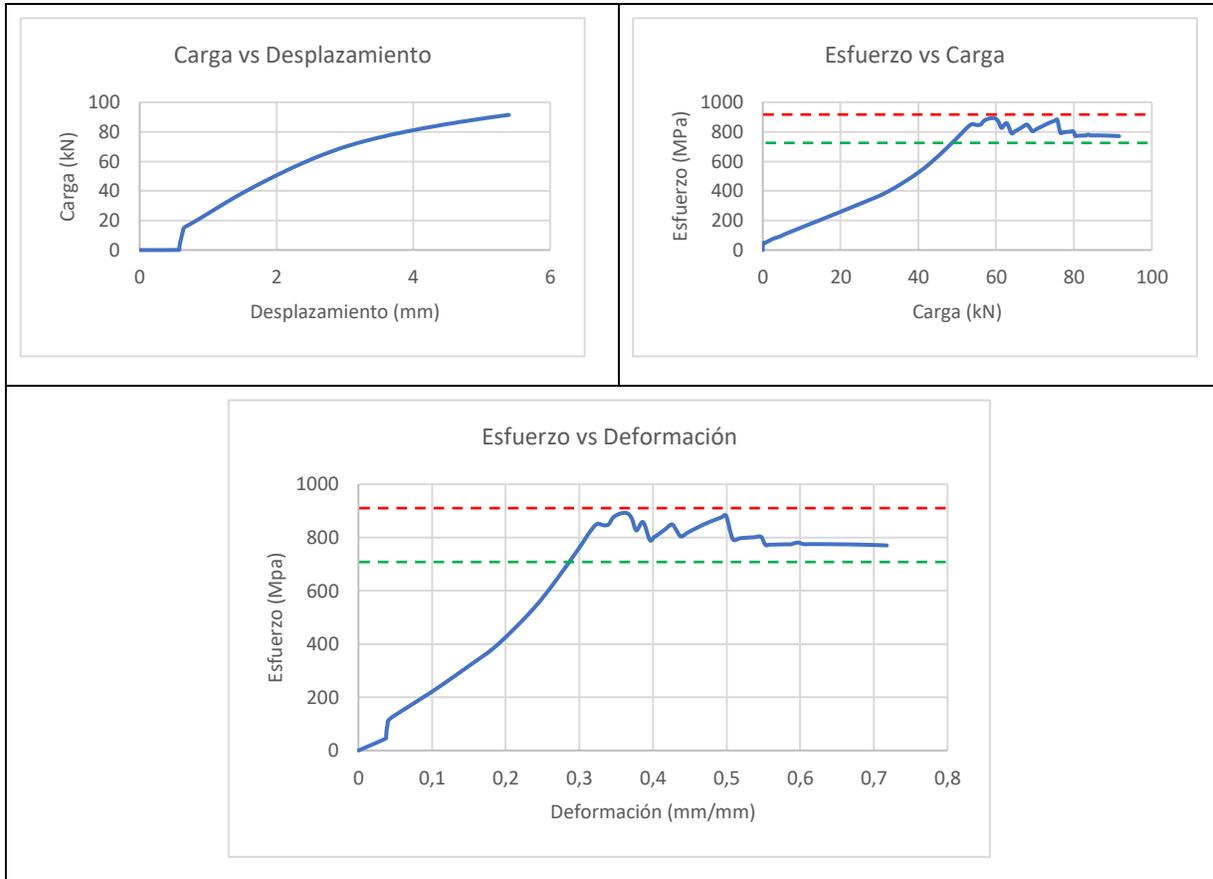
## Capítulo 4. Análisis de resultados

### 4.1.2.2. Resultados considerando la fibra del CLT paralela a la dirección de la carga



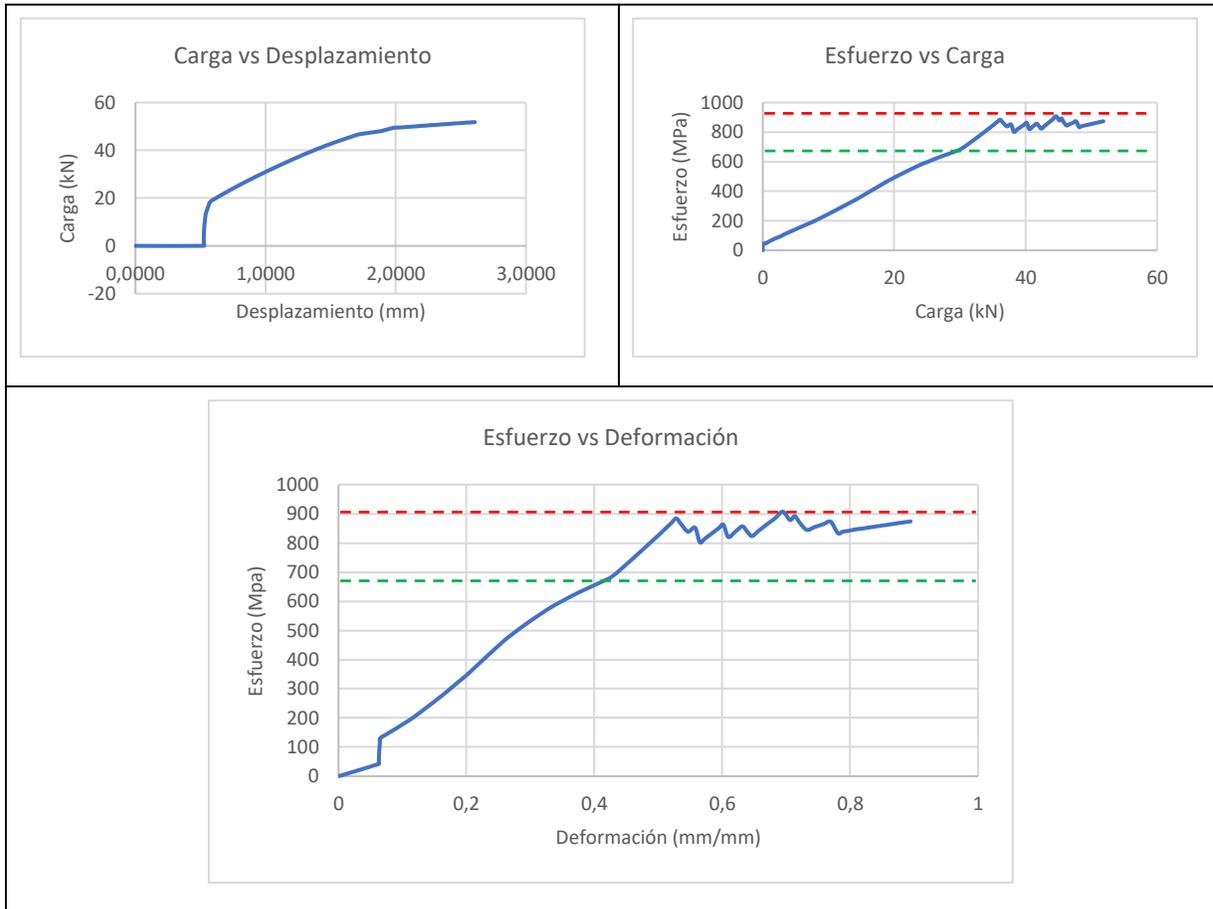
### 4.1.3. Configuración perno M12x100

#### 4.1.3.1. Resultados considerando la fibra del CLT perpendicular a la dirección de la carga



## Capítulo 4. Análisis de resultados

### 4.1.3.2. Resultados considerando la fibra del CLT paralela a la dirección de la carga



Al interpretar los resultados obtenidos en ANSYS de los conectores, se analizan los valores importantes en relación con la deformación, carga y esfuerzo. Los valores para cada conector se encuentran en las tablas 16, 17 y 18.

Tabla 16 Resultados Tornillo M12

Dirección de la fibra	Perpendicular	Paralela
<b>Limite elástico (Mpa)</b>	240	240
<b>Esfuerzo máximo (Mpa)</b>	336	321
<b>Carga limite elástico (kN)</b>	9.92	4.33
<b>Carga máxima (kN)</b>	40.17	21.567
<b>Deformación max (mm/mm)</b>	0,3242	0,23558

Tabla 17 Resultados Tornillo M16

Dirección de la fibra	Perpendicular	Paralela
<b>Limite elástico (Mpa)</b>	240	240
<b>Esfuerzo máximo (Mpa)</b>	312	321
<b>Carga limite elástico (kN)</b>	14.71	9.69
<b>Carga máxima (kN)</b>	58.46	32.119
<b>Deformación max (mm/mm)</b>	0,19293	0.43439

Tabla 18 Resultados Perno M12

Dirección de la fibra	Perpendicular	Paralela
<b>Limite elástico (Mpa)</b>	660	660
<b>Esfuerzo máximo (Mpa)</b>	882	892
<b>Carga limite elástico (kN)</b>	45.625	28.01
<b>Carga máxima (kN)</b>	75.704	45.453
<b>Deformación max (mm/mm)</b>	0.49926	0.6947

Se comparan los valores máximos de las tres configuraciones considerando la dirección de la fibra respecto a la de la carga. Se verifica que la disposición perpendicular es más resistente. La unión tipo perno posee mayor capacidad de carga, siendo una de las mejores opciones entre los modelos evaluados. Para no tener deformaciones plásticas en los conectores, los esfuerzos en los conectores no deben superar su límite elástico.

En este contexto, el perno sigue siendo la mejor opción, ya que este soporta hasta 4 veces más carga en comparación a los tornillos M12.

#### 4.1.4. Comparación de resultados por ensayos y simulación

Los resultados obtenidos de los artículos 2 y 6 del capítulo 3.1 principalmente abarcan la carga máxima (kN) que pueden soportar los conectores. Esta carga máxima ocurre en el momento de la ruptura del conector o también en la cesión de este con el panel CLT. Para los tornillos (M12 y M16) ocurrió cesión y para el perno (M12) ruptura. En la Tabla 19 se comparan los resultados de carga máxima de las simulaciones, donde existe similitud entre los ensayos y las simulaciones. No obstante, se observa que por elementos finitos (EF) existe un leve aumento en el caso de los tornillos y una leve disminución para el perno.

Tabla 19 Tabla comparativa carga máxima

Conector	Tornillo M12	Tornillo M16	Perno M12
<b>Carga máxima (kN) (2)</b>	37.5	53.6	-----
<b>Carga máxima (kN) (6)</b>	35.78	49.87	79.88
<b>Carga máxima (kN) EF</b>	40.17	58.46	75.704

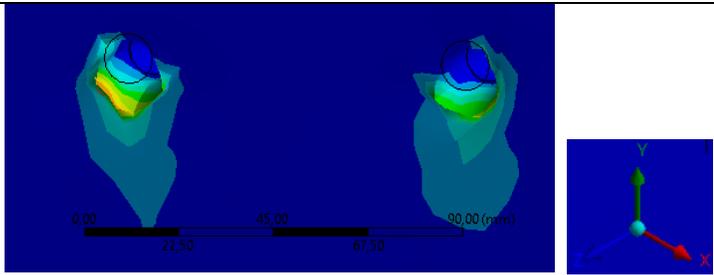
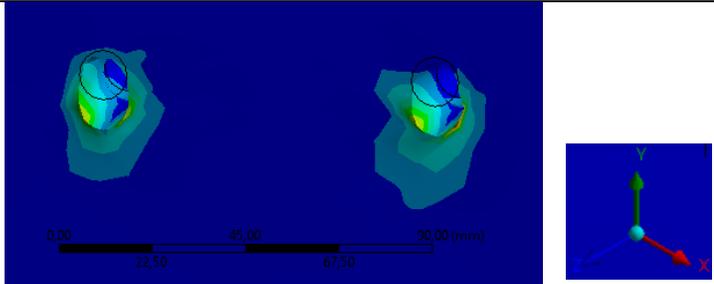
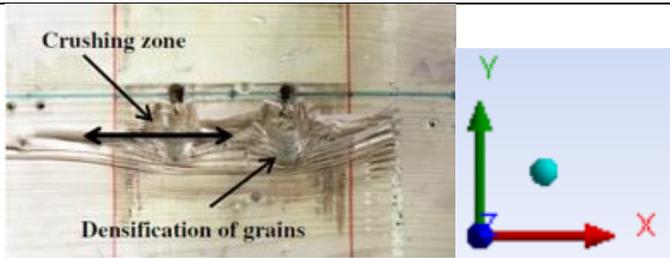
En ambas versiones se pueden ver como la carga máxima aumenta alrededor de 40% cuando se usa el tornillo de mayor diámetro. En el caso del perno este valor aumenta casi el doble siendo entre un 90% y un 120% en comparación con el tornillo M12.

## 4.2. DEFORMACIONES EN LOS PANELES CLT

Las fallas en los paneles dependían en muchos casos de la dirección de la fibra y la aplicación de la carga. Se encontraron en el estudio bibliográfico fallas por empotramiento, desgarro de la madera y por punzado. Los resultados de las deformaciones de los paneles se presentan a continuación separados por conector.

### 4.2.1. Deformaciones paneles CLT utilizando tornillos M12

Tabla 20 Deformaciones paneles con tornillos M12

Referencia	Deformaciones plásticas en Tornillos M12
<p>Simulación tornillo M12 contra fibra, vista frontal, fuente propia.</p>	
<p>Simulación tornillo M12 fibra en paralelo, vista frontal, fuente propia.</p>	
<p>Artículo N°2 (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2017)</p>	

Los resultados obtenidos por simulaciones presentan diferencias. Al analizar el panel orientado en contra fibra, la deformación se presenta más pronunciada en la dirección X en comparación con la fibra en paralelo, eso es porque bajo esta configuración el material es más resistente a la

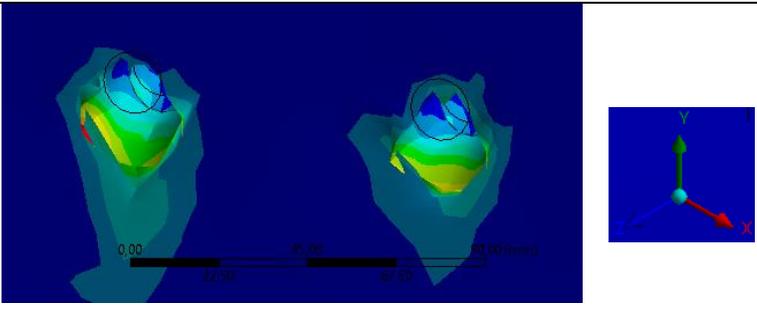
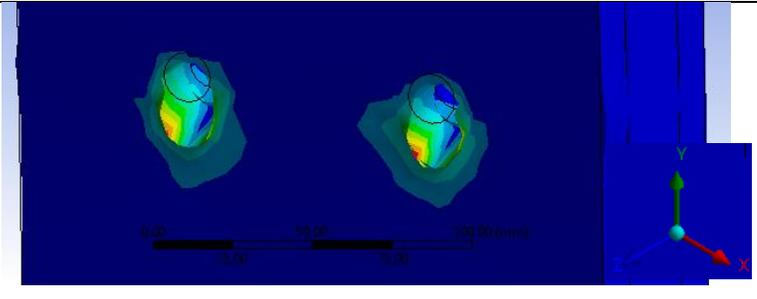
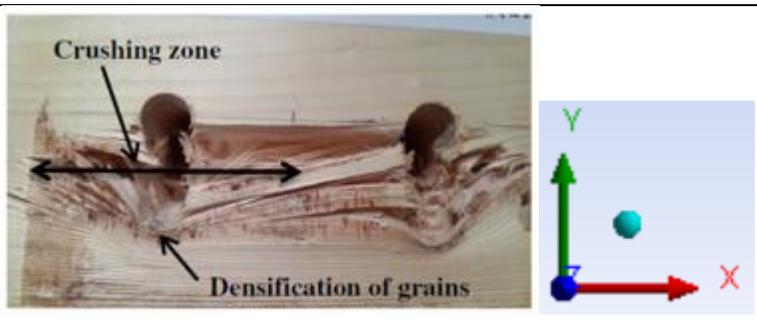
## Capítulo 4. Análisis de resultados

deformación en Y. Así mismo, si se analiza el panel orientado con la fibra en paralelo, este tiene menos resistencia en el eje Y, y existe una deformación más pronunciada bajo ese mismo eje.

Al final de la tabla 17 se puede apreciar mayor agrietamiento en el eje X y menor en el eje Y, coincidiendo en cierta forma con la deformación obtenida por la simulación. Ambas orientadas contra fibra. También se aprecia el desgarramiento de la madera en el eje Y

### 4.2.2. Deformaciones paneles CLT utilizando tornillos M16

Tabla 21 Deformaciones paneles con tornillos M16

Referencia	Deformaciones plásticas en Tornillos M16
Simulación tornillo M16 contra fibra, vista frontal, fuente propia.	
Simulación tornillo M16 fibra en paralelo, vista frontal, fuente propia.	
Artículo N°2 (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2017)	

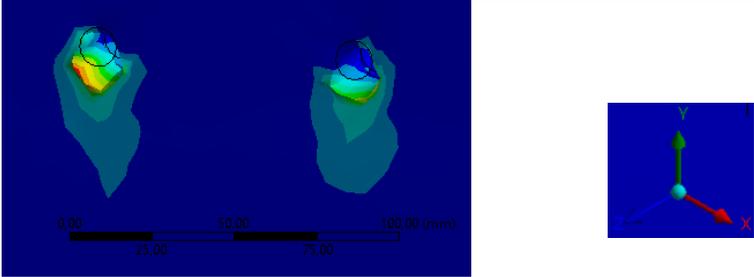
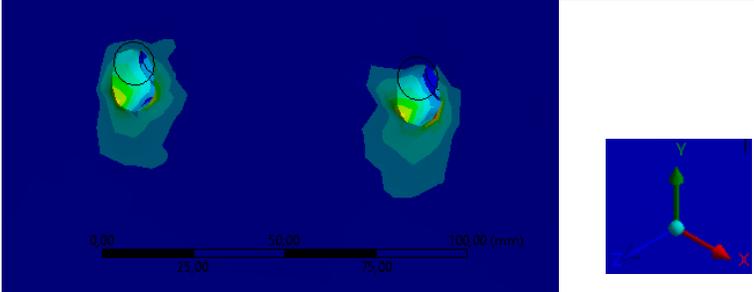
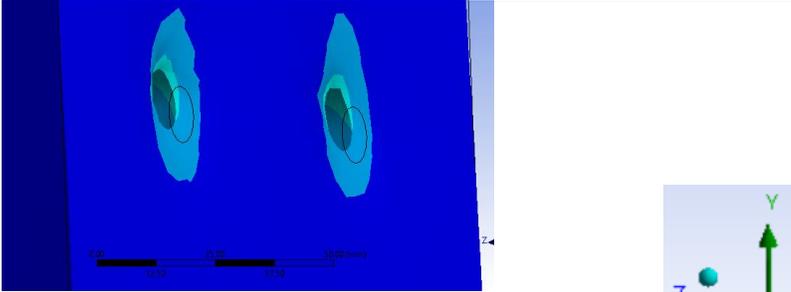
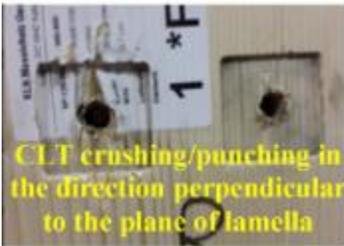
Existen bastante similitudes entre los resultados de los tornillos M12 con M16, entre los resultados obtenidos por las simulaciones utilizando tornillos M16 visualmente se aprecian

Capítulo 4. Análisis de resultados

mayores deformaciones que para los tornillos M12. Comparando los resultados de la simulación con el del artículo 2, también existen similitudes comparándolo con los resultados contra fibra de la simulación, siendo el agrietamiento mayor en el eje X y el desgarramiento de la madera en el eje Y.

**4.2.3. Deformaciones paneles CLT utilizando pernos M12**

Tabla 22 Deformaciones paneles con pernos M12

Referencia	Deformaciones plásticas en Perno M12
Simulación perno M12 contra fibra, vista frontal, fuente propia.	
Simulación perno M12 fibra en paralelo, vista frontal, fuente propia.	
Simulación perno M12 vista trasera, fuente propia.	
Artículo N°6 (A. Hassanieh, 2016)	

No se encontraron imágenes claras (vista frotal) para las deformaciones de los paneles utilizando pernos.

Se encuentran nuevamente similitudes en las deformaciones entre las simulaciones y los resultados experimentales. Es importante destacar que la configuración del perno se realizó un pretensado, por ende, existe una falla por punzado en la parte trasera de los paneles. En la falla del artículo N°6 se ve el aplastamiento del panel, a diferencia de la simulación se usa un recubrimiento en el perno, aun así, en ambos casos ocurre este tipo de falla.

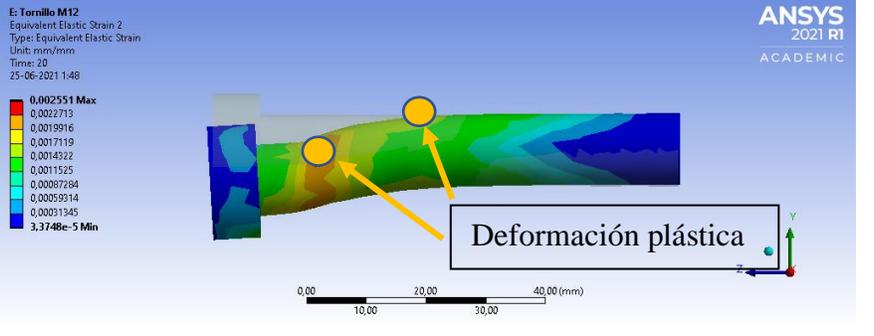
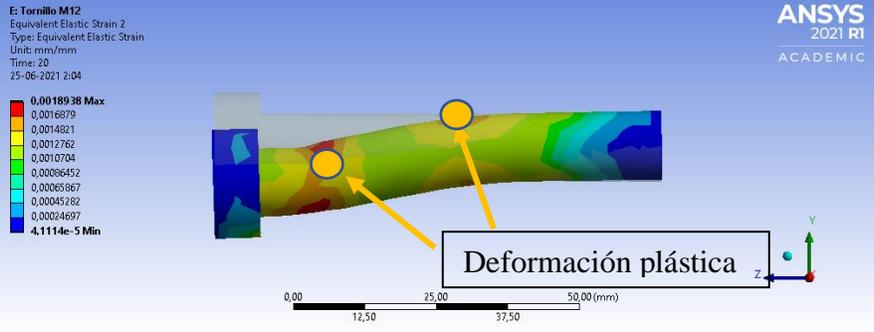
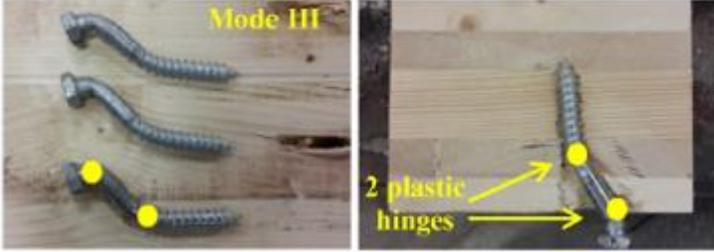
### **4.3. DEFORMACIONES EN LOS CONECTORES**

Muchas de las fallas de los conectores son por ruptura o por cesión, según la bibliografía estudiada (artículos N°2 y N°6). Las deformaciones de los conectores en las tablas 23, 24 y 25, es en el instante final de cada simulación, contemplando el resultado del conector hasta su ruptura o cesión.

A continuación, se presentan visualmente las deformaciones plásticas de los conectores por elementos finitos.

4.3.1. Deformaciones tornillos M12

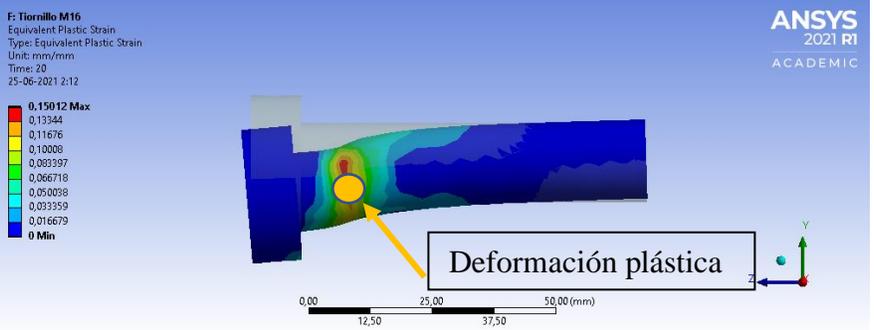
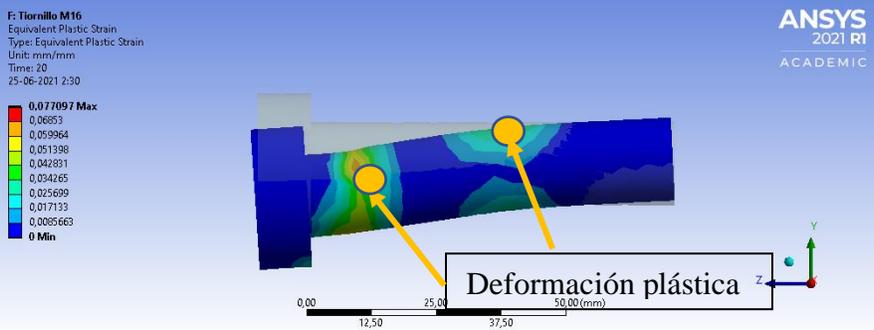
Tabla 23 Deformaciones plásticas tornillo M12

Referencia	Deformaciones plásticas en Tornillos M12
<p>Simulación tornillo M12 contra fibra, vista lateral, fuente propia.</p>	
<p>Simulación tornillo M12 fibra en paralelo, vista lateral, fuente propia.</p>	
<p>Artículo N°6 (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2016)</p>	
<p>Artículo N°2 (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2017)</p>	

Para todos los casos se pueden observar 2 zonas de deformaciones plásticas en este tipo de conector, bajo la cabeza del tornillo y aproximadamente en la mitad del hilo. Esto se explica porque para la primera capa de los paneles CLT existe un desgarramiento considerable que hace que el conector se deforme en esa dirección, dejando como resultado 2 deformaciones plásticas.

4.3.2. Deformaciones tornillos M16

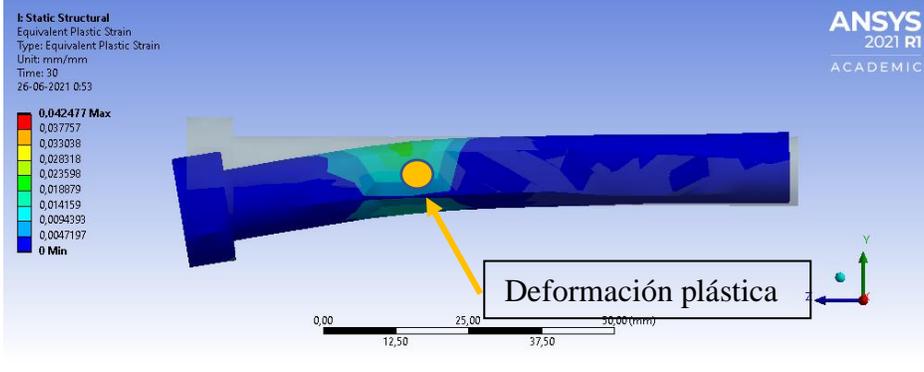
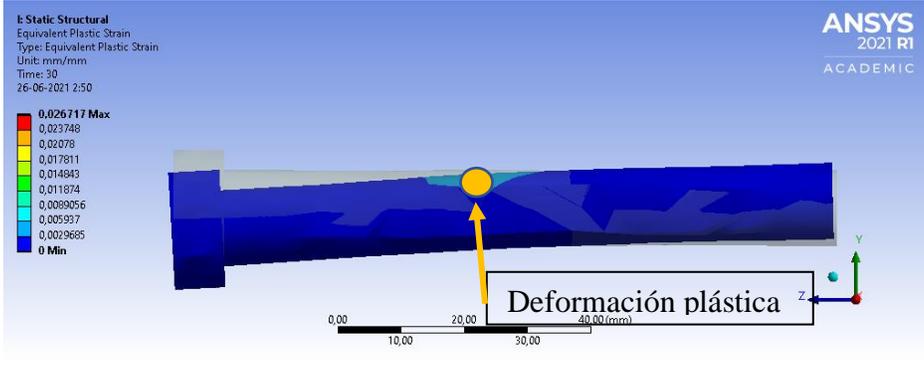
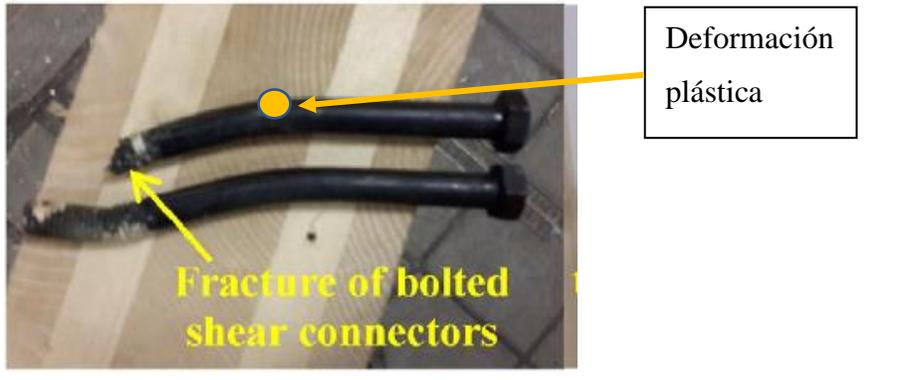
Tabla 24 Deformaciones plásticas tornillo M16

Referencia	Deformaciones plásticas en Tornillos M16
<p>Simulación tornillo M16 contra fibra, vista lateral, fuente propia.</p>	
<p>Simulación tornillo M16 fibra en paralelo, vista lateral, fuente propia.</p>	
<p>Artículo N°2 (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2017)</p>	
<p>Artículo N°6 (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2016)</p>	

Se observa 1 deformación plástica en el tornillo M16 y 2 zonas de deformaciones plásticas en el tornillo M16. Para todos los casos se observa un desgarró en la madera. La diferencia con el tornillo M12 es que la deformación plástica solo ocurre bajo la cabeza del perno.

4.3.3. Deformaciones pernos M12

Tabla 25 Deformaciones plásticas perno M12

Referencia	Deformaciones plásticas en Pernos M12
<p>Simulación perno M12 contra fibra, vista lateral, fuente propia.</p>	
<p>Simulación perno M12 fibra en paralelo, vista lateral, fuente propia.</p>	
<p>Artículo N°6 (A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, 2016)</p>	

Las simulaciones no entregan directamente la ruptura del material. Aunque si se interpreta por los gráficos del punto 4.1.3 que después del esfuerzo máximo hay un decaimiento de la curva que podría interpretarse como ruptura.

En la tabla 25 imagen 3, se observa la fractura del perno y también se aprecia una deformación plástica, esta deformación si se representa tanto en el ensayo como en las simulaciones.



## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

Las simulaciones computacionales son una herramienta muy importante y fundamental para la ingeniería actual, estos son indispensables para poder comprobar, analizar y modelar nuevas estructuras y aplicaciones.

Como primera parte de esta memoria se buscó la información necesaria para poder entender los usos de la madera contra laminada y como se relaciona con las conexiones para diferente uso. Esta etapa permitió contextualizar la problemática.

Para el segundo objetivo específico abordó un estudio bibliográfico sobre el análisis de fallas en uniones con paneles CLT, de todo el material investigado se seleccionaron seis artículos científicos los cuales fueron incluidos en la memoria. Este material bibliográfico brinda mucha información sobre como son las fallas y donde ocurren, además destaca con claridad la información de las fallas mostrando por medio de ilustraciones, sean estas por cesión, desgarro, corte, empotramiento, entre otros, en los conectores y paneles CLT.

El tercer objetivo fue la selección del tipo de falla a simular por elementos finitos. Se buscaron los parámetros más relevantes que influyen en las fallas del estudio bibliográfico y se procedió a definir las configuraciones para las simulaciones del objetivo N°4. Se seleccionaron 3 conectores diferentes (tornillos y pernos), la configuración de los paneles de madera y la forma de aplicación de la carga.

En el cuarto objetivo se enfoca en el modelamiento 3D por elementos finitos utilizando el programa ANSYS. En este punto se realizaron 6 simulaciones, considerando para cada conector la influencia de la dirección de la fibra de los paneles CLT. Para todos los casos la viga fue sometida a un desplazamiento en el eje Y, en ella se obtuvieron resultados de carga, esfuerzo, desplazamiento y deformación los cuales fueron los resultados que se estudiaron en el capítulo 4. Gracias a esta simulación se vieron las cargas máximas que soportan los conectores, antes de llegar a su límite elástico y después de sobrepasar el esfuerzo máximo de fluencia, comparando estos resultados con los ensayos vistos en la recopilación de datos (punto 3.1).

## Capítulo 5: Conclusiones

Este proceso de investigación resultó efectivo, entregando información importante para el desarrollo de la memoria. La recopilación de datos y el modelamiento 3D se complementan para entregar un buen análisis de fallas con respaldo científico.

Para finalizar se establece que cada objetivo específico fue realizado satisfactoriamente, por lo tanto, el objetivo general cumple con este cometido que es el dimensionamiento de uniones mediante mecánica computacional.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- A. Bellini, , L. Benedetti, L. Pozza, C. Mazzotti. (2020). "Experimental characterization of monotonic and cyclic behavior of steel-to-CLT nailed joints strengthened with composite plies" *Construction and Building Materials* 256 (2020) 119460. Bologna.
- A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford. (2016). "Load-slip behaviour of steel-cross laminated timber (CLT) composite connections" *Journal of Constructional Steel Research* 122 (2016) 110–121. Sydney.
- A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford. (2017). "Composite connections between CLT slab and steel beam: Experiments and empirical models" *Journal of Constructional Steel Research* 138 (2017) 823–836. Sydney.
- ANSI/AITC 405 . (2013). ANSI/AITC 405 .
- ANSI/ APA PRG 320. (2017). ANSI/ APA PRG 320.
- AS/NZS 2098.1. (2016). *Methods of Test for Veneer and Plywood -Moisture Content of Veneer and Plywood*.
- AS/NZS 3679.1. (2010). *Hot Rolled Bars and Sections*.
- Budynas–Nisbett. (2006). *Shigley’s Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- C. O’Ceallaigh, A.M. Harte. (2019). "The elastic and ductile behaviour of CLT wall-floor connections and the influence of fastener length" *Engineering Structures* 189 (2019) 319–331. Galway.
- Diario Sustentable. (16 de 04 de 2020). *Diario Sustentable*. Obtenido de <https://www.diariosustentable.com/2020/04/cinco-pisos-tendra-primer-edificio-100-de-clt-construido-en-chile/>
- Erol Karacabeyli, B. D. (2013). *CLT Handbook Cross-Laminated Timber*. FPInnovations and Binational Softwood Lumber Council .
- J. Liu, F. Lam. (2018). "Experimental test of coupling effect on CLT angle bracket connections" *Engineering Structures* 171 (2018) 862–873. Vancouver.

## Referencias

Karin Saavedra, Mariela Reyes. (10 de Septiembre de 2020). Revista Energia. Obtenido de <https://www.revistaenergia.com/21827/>

Madera Estructural Wordpress. Obtenido de <https://maderaestructural.wordpress.com/2019/10/14/madera-de-ingenieria-y-adhesivos/>

Rothoblaas. (2019). Tornillos y conectores para madera. Cortaccia: Rotho Blaas srl.

Sunar, Ö. (7 de Marzo de 2021). Mechead. Obtenido de <https://www.mehead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/>

W. Dong, M. Li, L.M. Ottenhaus, H. Lim. (2020). "Ductility and overstrength of nailed CLT hold-down connections" Engineering Structures 215 (2020) 110667. Christchurch.

Waugh Thistleton. (2018). 100 Proyectos UK CLT. Waugh Thistleton Architects.

Zúñiga, D. (13 de 11 de 2019). Madera 21. Obtenido de <https://www.madera21.cl/polomadera-muestra-las-ventajas-de-la-madera-con-la-construccion-de-un-edificio-de-ocho-pisos-en-clt/>

Zúñiga, D. (14 de 09 de 2020). Madera 21. Obtenido de <https://www.madera21.cl/desde-tornillos-a-conectores-de-vigas-la-funcion-de-los-sistemas-de-conexion-en-la-construccion-con-estructuras-de-madera/>

## **ANEXO 1: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 1**

### **▪ Identificación**

**“Caracterización experimental del comportamiento monotónico y cíclico de uniones clavadas de acero a CLT reforzadas con láminas de material compuesto”.**

Alessandro Bellini, Luca Benedetti, Luca Pozza, Claudio Mazzotti. “Experimental characterization of monotonic and cyclic behavior of steel-to-CLT nailed joints strengthened with composite plies” Construction and Building Materials 256 (2020) 119460.

### **▪ Descripción**

Este estudio tiene como objetivo investigar, mediante ensayos experimentales monótonos y cíclicos, la eficacia para mejorar la capacidad de carga y la rigidez de las uniones clavadas de placas de acero a CLT, mediante el uso de una lámina compuesta pegada a la superficie clavada de CLT.

El ensayo experimental, consistente en un número total de 80 ensayos. En particular, para cada grupo, se indica el número de ensayos, el tipo de conexión, la dirección de la carga con respecto a la fibra, la presencia del sistema de refuerzo, el tipo de ensayo (monotónico o cíclico) y el modo de fallo.

### **▪ Materiales Utilizados**

- Paneles CLT de madera joven C24 acorde a [1.1], de dimensiones 200 x 600 mm<sup>2</sup>, formado por 5 capas de tablas ordenados transversalmente de un espesor de 20 mm cada capa. Para este experimento los paneles CLT tienen una temperatura ambiente (20°C ± 2°C) y de una humedad relativa del 12%.
- Placas de acero de grado S275 de 100 x 450 mm<sup>2</sup> con 6 mm de espesor.
- Tornillos (4 x 60 mm) con una separación entre tornillos de 20 mm transversal al panel y 40 mm en paralelo al panel y 8 tornillos (6 x 60 mm) con una separación entre tornillos de 30 mm transversal al panel y 60 mm en paralelo al panel.

- La superficie del CLT se reforzó utilizando un tejido de carbono multiaxial, esta fue adherida al panel CLT por una resina epoxi. Las características mecánicas están acorde a [1.2]

#### ▪ **Configuración y montaje**

El conjunto del panel CLT con la placa se colocaron en un marco rígido de acero equipado con elementos de reacción de acero en la parte delantera y trasera para evitar los desplazamientos horizontales y verticales de las muestras de CLT. Para los tornillos conectados en la placa de acero, su distribución se observa con más claridad en la figura 1.

El extremo libre de la placa de acero (la parte de la placa no conectada al panel CLT) se sujetó con cinco pernos de 12 mm de grado 8.8 dentro de un sistema de dos placas de acero y conectado a un actuador electromecánico mediante una bisagra central que permitía rotaciones alrededor del eje vertical. El deslizamiento entre la placa de acero y el actuador se evitó mediante el apriete por fricción de los pernos.

Se utilizó una celda de carga de clase 0,5 con una capacidad máxima de 100 kN para medir la fuerza aplicada por el actuador, mientras que dos transductores de desplazamiento de 50 mm (LVDT) para medir el desplazamiento relativo (deslizamiento) entre la placa de acero clavada y el panel de CLT. Los datos se registraron durante ambos ensayos adoptando una frecuencia de muestreo de 5 Hz.

El protocolo prescrito por la norma EN 26891 [1.3] se adoptó para los ensayos monótonos. Los ensayos se llevaron a cabo bajo control de desplazamiento, imponiendo una tasa de 2 mm/min durante el primer ciclo, realizando hasta el 40% de la capacidad máxima estimada, tras lo cual la carga se mantuvo constante durante 30 s y luego se redujo hasta el 10% de la fuerza máxima estimada; finalmente, tras otros 30 s, el desplazamiento se incrementó a un ritmo de 4 mm/min hasta el fallo del sistema.

Los ensayos cíclicos se realizaron según la norma UNI EN 12512[1.4]. Los ensayos se realizaron bajo el control de desplazamiento adoptando una velocidad de ensayo de 2 mm/min durante los ciclos, que luego se incrementó a un valor máximo de 4 mm/min durante la fase de carga final (hasta el fallo de la conexión).

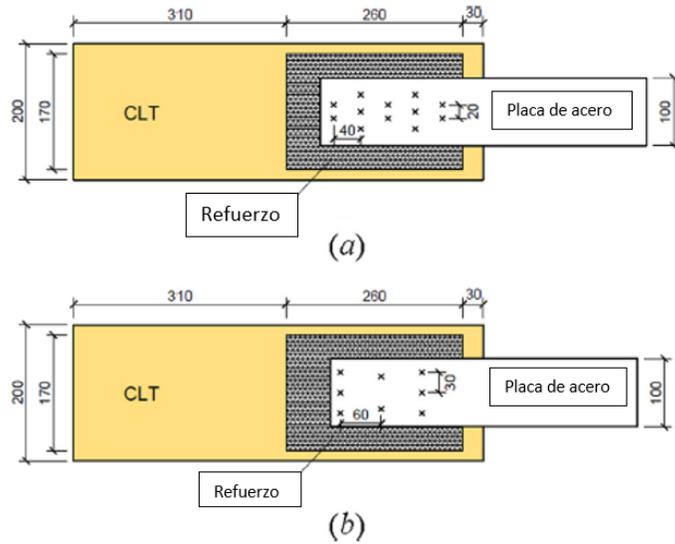


Figura 1 conexión tornillos 4 x 60 mm (b) conexión tornillos 6 x 60 mm

▪ **Resultados**

Los resultados obtenidos de los ensayos monótonos son los siguientes:

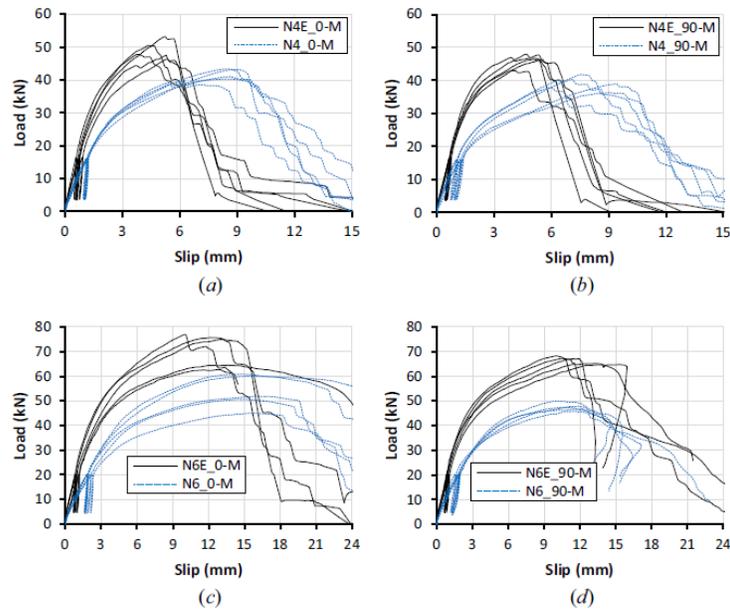


Figura 2 Curvas experimentales monótonas de carga-deslizamiento de las muestras no reforzadas (líneas azules discontinuas) superpuestas a las muestras reforzadas (líneas negras continuas).

Se puede observar en la Figura 2 que los valores de fuerza máxima de las muestras reforzadas son siempre mayores que los valores correspondientes de las no reforzadas, independientemente de la orientación del grano o de los diámetros de los tornillos.

Comparando las curvas de las muestras cargadas en paralelo al grano con las cargadas perpendicularmente al grano, se observa que, independientemente de los diámetros de los tornillos y de la presencia de la capa de refuerzo, los valores de fuerza máxima suelen ser menores en las muestras cargadas perpendicular al grano ( $90^\circ$ ).

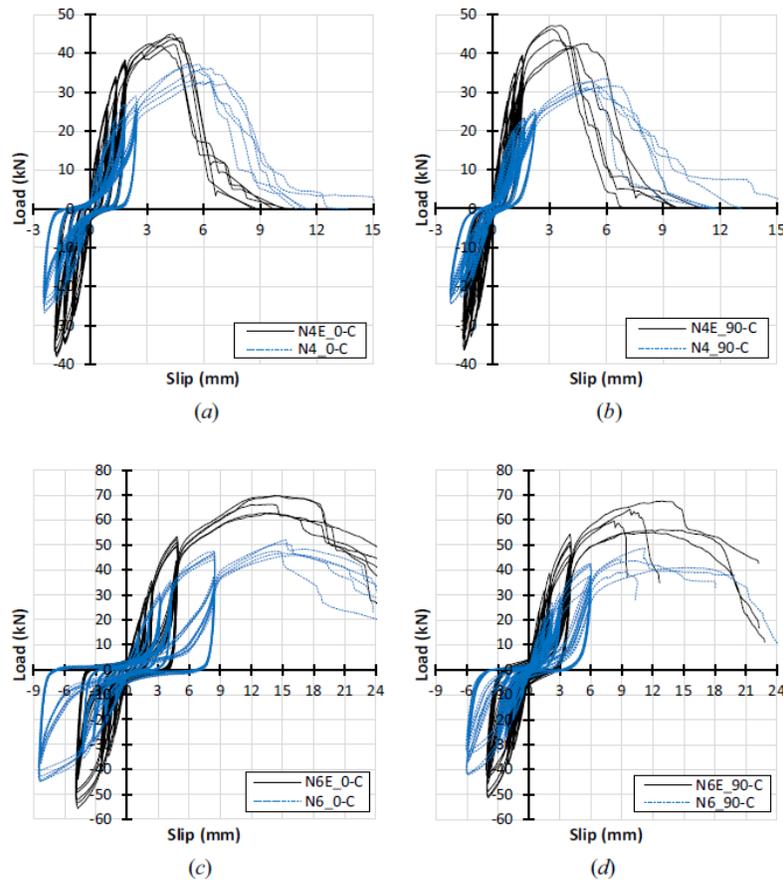


Figura 3 Curvas experimentales de fuerza-deslizamiento cíclico de muestras no reforzadas (líneas azules discontinuas) superpuestas a muestras reforzadas (líneas negras continuas).

Las curvas carga-deslizamiento cíclicas de la figura 3 muestran un comportamiento cualitativamente similar a las monótonas, ya que las muestras reforzadas se caracterizan por una mayor fuerza, un menor deslizamiento y una rigidez globalmente mayor, si se comparan con las no reforzadas.

## Anexos

Al igual que en los ensayos monótonos, el refuerzo es capaz de reducir las diferencias entre la respuesta de las muestras cargadas a lo largo de las dos direcciones diferentes (es decir, perpendicular y paralela al grano).

Si se comparan las curvas de fuerza-deslizamiento cíclicas con las monótonas, siempre es posible observar una reducción general de la fuerza máxima (10-12%) debido a la pequeña degradación de la resistencia en los ciclos repetidos. Además, se observa una reducción del deslizamiento máximo cíclico con respecto al monótono, puede observarse para las muestras fijadas con tornillos de 4 mm, lo que significa que el refuerzo reduce efectivamente el deslizamiento del tornillo en la fase post-elástica.

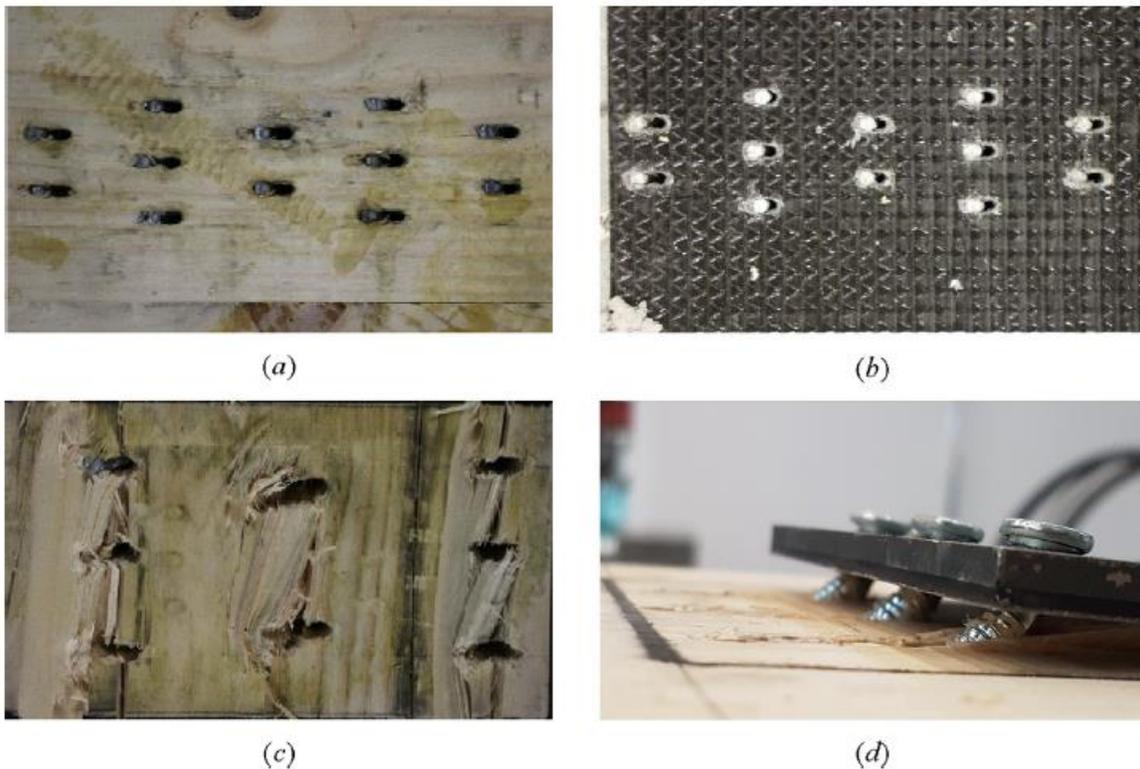


Figura 4 Modos de fallo identificados durante las pruebas: (a) Modo de fallo A (empotramiento); (b) Modo de fallo B (empotramiento reducido); (c) Modo de fallo C (empotramiento con daño superficial); (d) Detalle del tornillo deformado al final del ensayo.

La falla tipo A se refiere a un ejemplo de fallo de empotramiento del panel de madera. La falla tipo B se refiere a un empotramiento reducido debido al refuerzo compuesto aplicado. La falla tipo C muestra el empotramiento del panel CLT asociado a un daño superficial notable (es decir, la eliminación de la fibra de madera).

En respecto al tipo de fallo D, para los tornillos utilizados se observa la deformación plástica de ellos y el desgarro de la madera a lo largo de dirección de la carga.

- **Conclusiones**

Existe un efecto beneficioso del sistema de refuerzo (tejido de carbono multiaxial) en el comportamiento de conexión, que obtiene una mayor capacidad de carga en las pruebas monótonas y cíclicas. También se ve una mejora por el refuerzo cuando la carga aplicada fue perpendicular a la fibra ( $0^\circ$ ). El refuerzo es capaz de aumentar tanto la fuerza máxima como fuerza de tensión de la conexión y conduce a una reducción general del desplazamiento.

El tipo de falla más notoria ocurre cuando no existe refuerzo, donde los tornillos logran deformarse, creando un desplazamiento entre el conector con el panel. Si se compara el tipo de dirección de la fibra al estar en  $90^\circ$  respecto a la sollicitación, disminuye la capacidad de carga respecto a la de  $0^\circ$ . Así mismo ocurre con el tipo de fijación al panel CLT, donde los 12 tornillos (4 x 60 mm) tienen menos capacidad de carga que los 8 tornillos (6 x 60 mm).

- **Principales normas utilizadas en el artículo.**

[1.1] EN 338. Structural timber. Strength classes. Brussels, Belgium: CEN. 2009

[1.2] ISO 1675. Plastics – Liquid resins – Determination of density by the pycnometer method. ISO/TC 61/SC5 Physical-chemical properties. 1985.

[1.3] EN 26891. Timber structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics. Brussels, Belgium: CEN. 1991.

[1.4] UNI EN 12512. Timber structures. Test methods. Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. UNI. 2006.

## **ANEXO 2: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 2**

### **▪ Identificación**

#### **“Conexiones entre un panel CLT y viga de acero: Experimentos y modelos empíricos”**

A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, “Composite connections between CLT slab and steel beam: Experiments and empirical models” *Journal of Constructional Steel Research* 138 (2017), pp. 823–836

### **▪ Descripción**

Este trabajo tiene como objetivo el estudio del comportamiento de la unión entre una losa de CLT (para suelo) y una viga de acero, mediante ensayos de “push-out”, en otras palabras, se aplica una carga entre los conectores que unen a la viga y los paneles, esta carga aumenta constantemente dentro de un determinado tiempo, entregando resultados de carga-desplazamiento.

Se realizaron ensayos de “push-out” en tres grandes grupos (y subgrupos) de conexión de acero-CLT, los conectores se clasificaron en tornillos de cabeza hexagonal, tornillos de cabeza hexagonal punta broca, y pernos incrustados en cementada. Las principales variables consideradas en el programa experimental fueron el diámetro de los tornillos y pernos, la dirección de la carga con respecto a la fibra del panel CLT y el recubrimiento.

### **▪ Materiales Utilizados**

- Paneles CLT de madera de abeto noruego C24 acorde a [2.1], de dimensiones 400 x 600 mm<sup>2</sup>, utilizado para tornillos de cabeza hexagonal punta broca, y pernos incrustados en cementada y paneles de dimensiones 400 x 400 mm<sup>2</sup>, utilizado para tornillos de cabeza hexagonal, ambos formados por 5 capas de tablas ordenados transversalmente de un espesor de 20 mm cada capa y 40 mm para la capa del medio. La humedad relativa del panel es del 12%.
- Perfil de acero laminado en caliente 310 UB 40.4 bajo la norma AS/NZS 3679.1 [2.2]

## Anexos

- La base de cemento utilizada para rellenar la cavidad alrededor de los pernos es de alta resistencia, basado en la norma AS 1478.2.2005 [2.3]
- Los conectores utilizados se describen de mejor forma en las siguientes tablas, donde: Coach screw (CS) es tornillos de cabeza hexagonal, Dog screw (DS) es tornillos de cabeza hexagonal punta broca y Bolt es perno.

Nominal mechanical properties and dimensions of the fasteners.

Fastener	Diameter (mm)	Length (mm)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)
Coach screw	16	100	240	400
Dog screw	19	135	400	500
Bolt	16	150	640	800
	20	110		

Tested connections details.

Connection type	Dimension (mm) (Diameter × length)	Fasteners steel grade	Grain direction
Coach screw	12 mm × 100 mm	4.6	Perpendicular
	16 mm × 100 mm	4.6	
	20 mm × 100 mm	4.6	
Dog screw	16 mm × 125 mm	5.8	Parallel
	19 mm × 135 mm	5.8	
Grout pocket	12 mm × 130 mm	8.8	Parallel
	60 mm × 135 mm		
	16 mm × 130 mm	4.6	
	80 mm × 135 mm		
20 mm × 130 mm	8.8	80 mm × 135 mm	
	8.8	60 mm × 135 mm	
	8.8	80 mm × 135 mm	

### ▪ Configuración y montaje

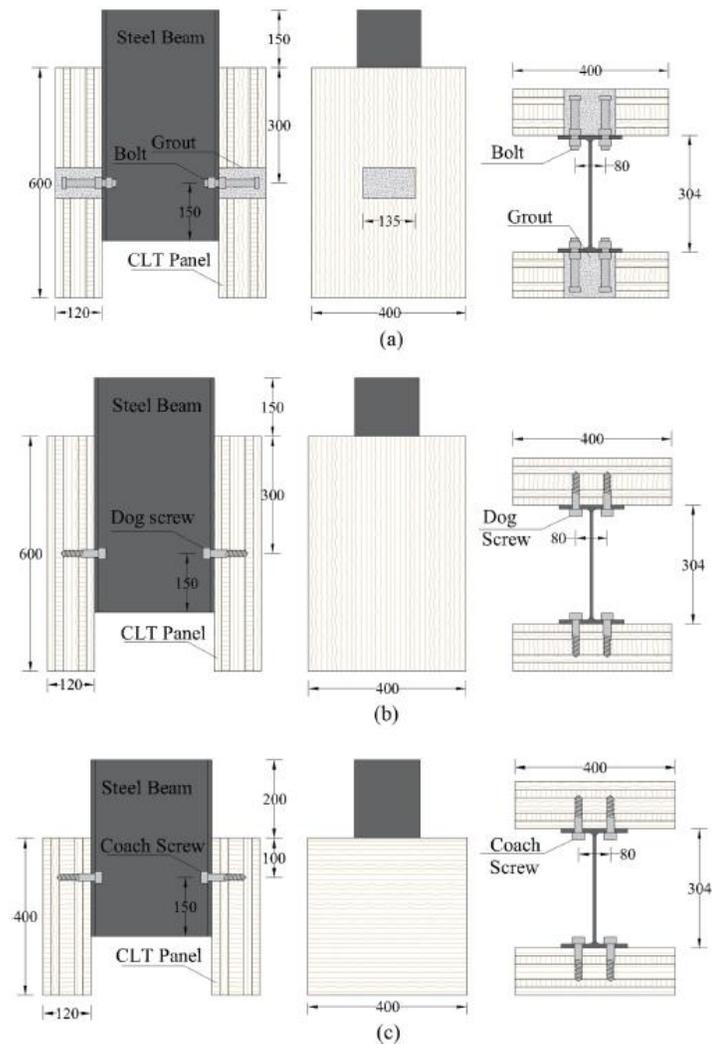
La conexión acero-CLT se cargó según el protocolo de carga acorde a la norma BS EN26891 [2.4]

#### Montaje tornillos:

En este grupo los tornillos se conectaron con los perfiles de acero a los paneles CLT, dos tornillos con una distancia entre centros de 80 mm en ambos extremos. Los paneles y perfiles fueron pre perforados para facilitar la conexión. En la figura 2 se muestra el montaje del ensayo.

Montaje perno-cementada:

Para esta conexión se cortó una sección rectangular de 135 x 60/80 mm en el panel para la conexión del perno y la cementada, al conectar los pernos al perfil se sellaron con cinta adhesiva resistente al agua, esto para evitar que entre humedad en el panel CLT. Como último paso se rellenó la sección cortada con la cementada. En la figura 2 se muestra el montaje del ensayo.



*Figura 5 Montaje conectores-panel*

Los modos de fallo en las fijaciones tipo clavija con conexiones de madera pueden clasificarse en tres categorías, modos I, II y III. En el modo de fallo I, sólo se produce el aplastamiento de la madera, sin ninguna deformación plástica en los elementos de fijación. Sin embargo, en los modos de fallo II y III, se producen una y dos deformaciones plásticas dentro de los elementos

## Anexos

de fijación, respectivamente. Además, en los modos de fallo II y III puede producirse un aplastamiento parcial de la madera alrededor de los conectores y en las láminas exteriores del CLT. Con respecto a esta clasificación, se observó que el modo de fallo III era dominante en tornillos de cabeza hexagonal de 12 mm, mientras que el modo de fallo II pasó a ser dominante en los conectores a cortante con tornillos de cabeza hexagonal de 16 y 20 mm.

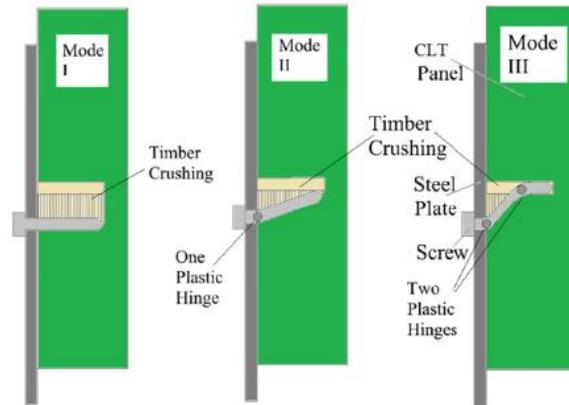


Figura 6 Modo de fallo de las fijaciones tipo clavija en conexiones de madera modo I, modo II y modo III.

▪ **Resultados**

**Conexiones con tornillos de cabeza hexagonal o Coach Screws (CS)**

La dirección de la carga en las muestras del ensayo “push-out” con uniones CS fue perpendicular a la fibra de la madera en las láminas exteriores del CLT. En estas muestras se observó una zona de aplastamiento relativamente grande alrededor de las fijaciones. El tamaño de la zona de aplastamiento se correlaciona directamente con el tamaño de los tornillos.

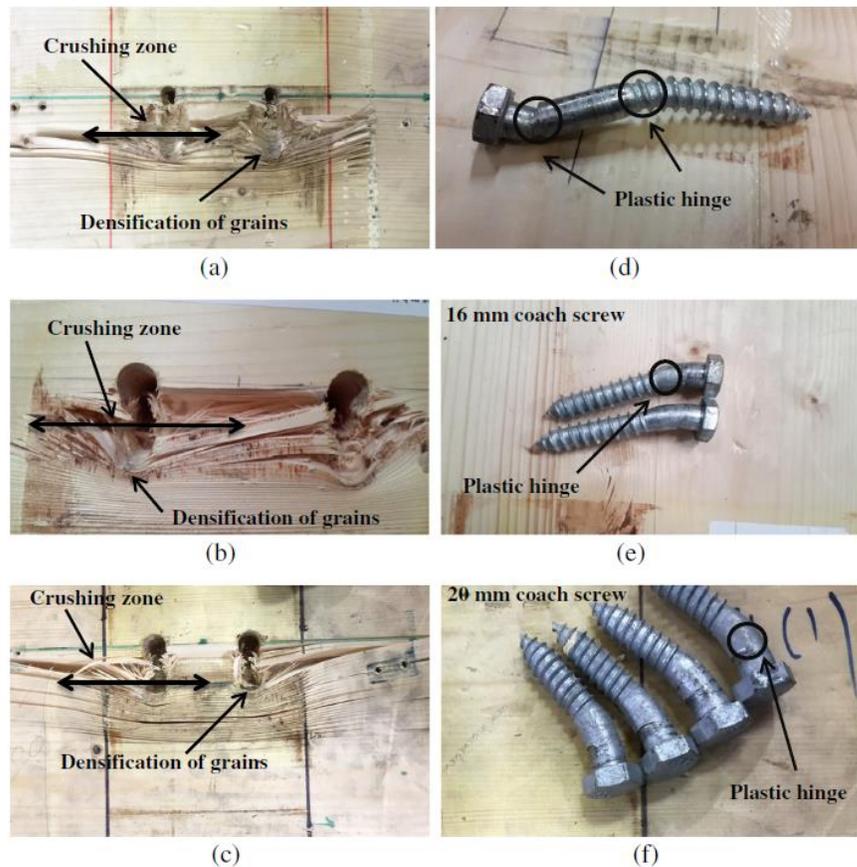


Figura 7 Modos de fallo en vigas de acero-CLT con tornillos CS

Fallas visibles en probetas de acero-CLT con tornillos CS (Figura 7). Ocurre un aplastamiento en los paneles CLT (láminas exteriores cargadas perpendicularmente a la fibra) para probetas con tornillos CS de 12, 16 y 20 mm, (a) (b) y (c) respectivamente. Los modos de fallo de los elementos de fijación asociados a la formación de dos deformaciones plásticas en tornillos de 12 mm (d), una deformación plástica en tornillo de 16 mm (e) y una deformación plástica en tornillo de 20 mm (f).

**Conexiones con tornillos de cabeza hexagonal punta broca o Dog Screws (DS)**

La dirección de la carga en las pruebas con conexiones de tornillos DS era paralela a la fibra de la madera en las láminas exteriores del CLT, y el tamaño de la zona de aplastamiento de las uniones con tornillos DS fue menor a diferencia de las probetas con tornillos CS en las que las capas exteriores de los paneles de madera se cargaron perpendicular a la dirección de la fibra. La deformación de los tornillos de 16 mm y 19 mm era demostrativa con una sola deformación plástica en los elementos de fijación. Ver Figura 8

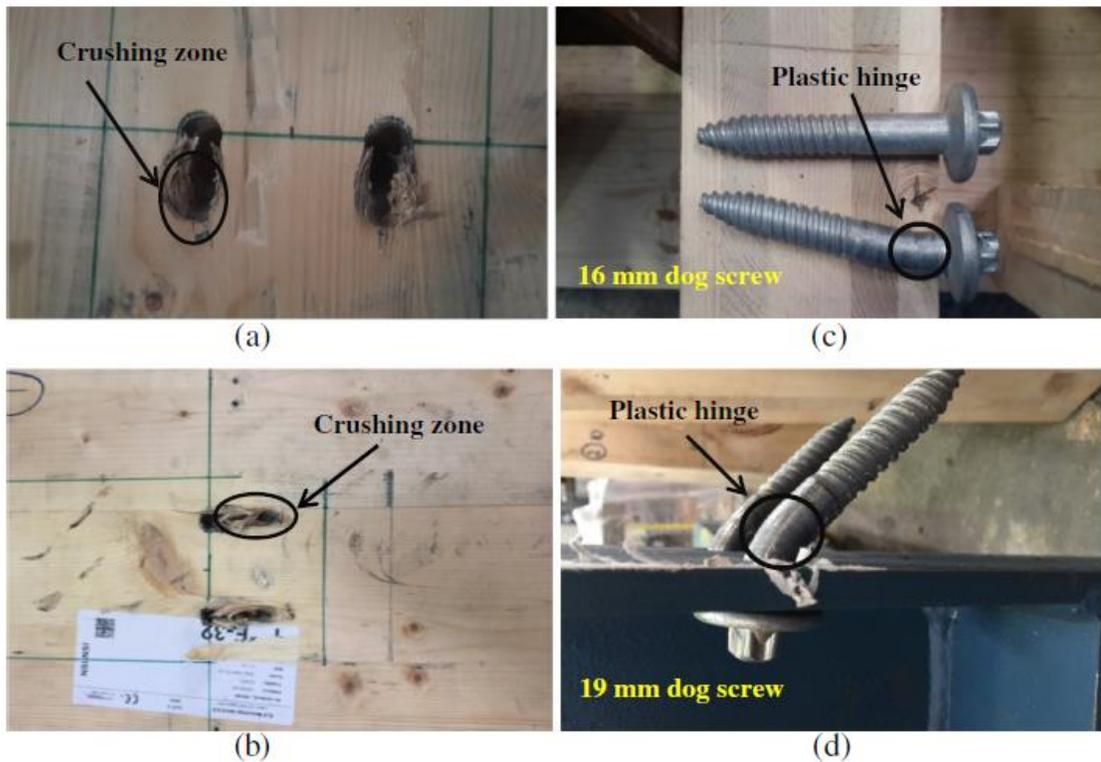


Figura 8 Modos de fallo en vigas de acero-CLT con tornillos DS

Modos de fallo en las vigas de acero-CLT con conectores de tornillo DS, ocurre un aplastamiento en los paneles CLT (láminas exteriores cargadas paralelamente a la fibra) para tornillos de 16 y 20 mm (a) y (b) respectivamente. Los modos de fallo de los conectores asociados con la formación de una deformación plástica en tornillo de 16 mm (c) y tornillo de 19 mm (d).

**Conexiones con pernos incrustados en cementada o “Bolts embedded in the Grout Pocket”**

**(BGP)**

Las uniones BGP presentaron un modo de fallo mixto asociado al aplastamiento de los paneles CLT, correspondientes al agrietamiento y aplastamiento de la cementada, también, la existencia de una deformación plástica en los pernos, y a la flexión y deformación plástica en el ala de los perfiles de acero. A pesar del agrietamiento y aplastamiento de la cementada y del aplastamiento de los paneles de CLT, no se observó ninguna evidencia de daño y/o deformación excesiva en la conexión BGP. En los pernos de grado 8.8 y 4.6, se produjo una excesiva deformación plástica.

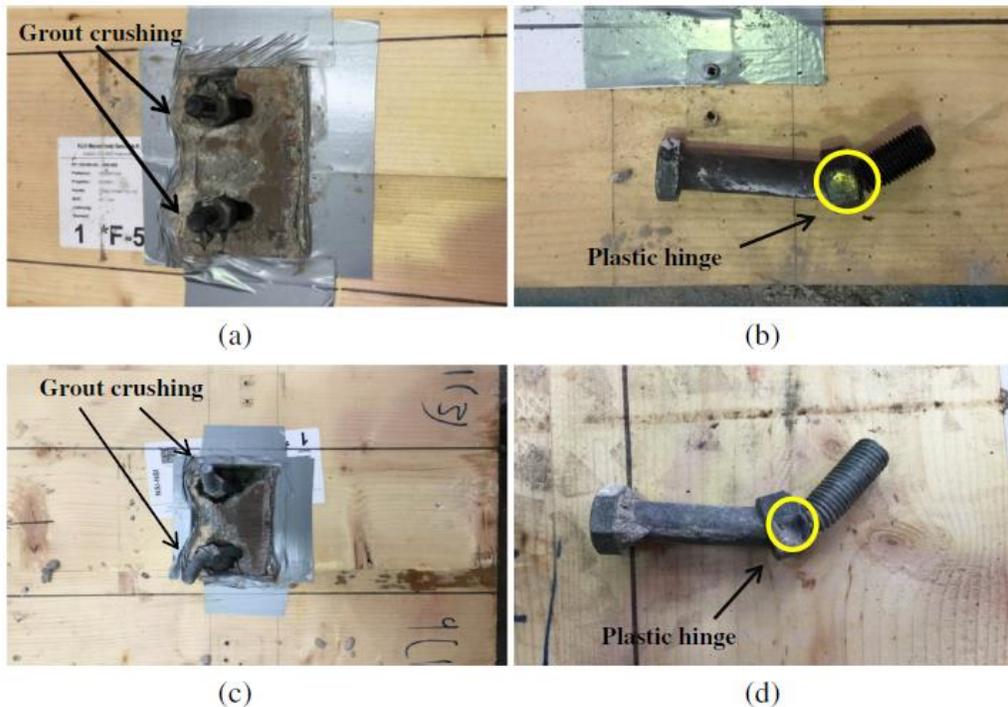


Figura 9 Fallo de conexión BGP16 grado 4.6 y 8.8

Modos de fallo en las vigas de acero-CLT con conectores BGP, ocurre un aplastamiento en la cementada (láminas exteriores cargadas paralelamente a la fibra) (a) y (c) respectivamente. Los modos de fallo de los conectores asociados con la formación de una deformación plástica en los pernos grado 4.6 (b) y grado 8.8 (d).

- **Conclusiones**

La rigidez y la resistencia de los conectores de pernos en la cavidad de la cementada es significativamente mayor que la de los tornillos CS y DS. La rigidez inicial de las uniones cargadas perpendicularmente a la fibra es menor que la rigidez inicial de las uniones cargadas paralelamente a la fibra.

- **Principales normas utilizadas en el artículo.**

[2.1] British Standards Institute, BS EN 338: Structural timber - Strength Classes, 2009.

[2.2] Standards Australia, AS/NZS 3679.1:2010 Hot Rolled Bars and Sections, Standards Australia, 2012.

[2.3] AS 1478.2, 2005 Chemical Admixtures for Concrete, Mortar and Grout – Methods of Sampling and Testing Admixtures for Concrete, Mortar and Grout, Standards Australia, 2005.

[2.4] EN-26891, CEN, Timber Structures, Joints Made With Mechanical Fasteners, General Principles for the Determination of Strength and Deformation Characteristics, BSI: European Committee for Standardization, Brussels (Belgium), 1991.

### **ANEXO 3: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 3**

#### **▪ Identificación**

#### **“Comportamiento elástico y dúctil de las uniones entre paredes y suelos de CLT e influencia de la longitud de las fijaciones”**

Conan O'Ceallaigh, Annette M. Harte, “The elastic and ductile behaviour of CLT wall-floor connections and the influence of fastener length”, *Engineering Structures* 189 (2019), pp. 319–331

#### **▪ Descripción**

Este trabajo tiene como objetivo el análisis del comportamiento elástico y dúctil de la conexión de un ángulo de refuerzo en un panel CLT, por ello se examina la influencia de la longitud de los soportes en condiciones de carga y corte, y también la cantidad de tornillos usados en ellos. Se realizaron dos ensayos en este trabajo, ensayo monotónico y cíclico.

El ensayo monotónico de acuerdo con la norma EN 26891 [3.1], con un solo tornillo de diferente longitud (25 mm, 50 mm y 75 mm).

El ensayo cíclico, de acuerdo con la norma EN 12512 [3.2], con múltiples tornillos en conexión con un ángulo de refuerzo. Se sometieron a pruebas cíclicas de tracción y corte, para evaluar la carga de fallo y la degradación de la resistencia asociado a dicha conexión.

#### **▪ Materiales Utilizados**

- Paneles CLT de madera de abeto de Sitka de grado C16, acorde a [3.3]. Los paneles CLT utilizados para este estudio son de 3 y 5 capas, donde los paneles de 3 capas se construyeron con tablas de 20 mm y 40 mm para obtener un espesor de 60 mm y 120 mm respectivamente, y para los paneles de 5 capas se utilizaron tablas de 20 mm para obtener un espesor de 100 mm en total. Los paneles se acondicionaron inicialmente a una humedad relativa del  $65 \pm 5\%$  y a una temperatura de  $20 \pm 2$  °C.
- Tornillos [3.4] de 5 mm de diámetro de longitud de 25 mm, 50 mm y 75 mm para examinar la influencia de la longitud de los tornillos en el comportamiento del fallo en el CLT, estos tornillos fueron utilizados en los paneles de fueron 60 mm, 100 mm y 120 mm respectivamente.

- Los ángulos [3.5] de refuerzo utilizados en los ensayos de conexión se fijaron con cuatro tornillos en la cara horizontal y cuatro tornillos en la cara vertical. Las caras horizontales y verticales de las escuadras tenían un grosor de 2mm de espesor.

- **Configuración y montaje**

### **Pruebas monótonas de tensión y cizallamiento en elementos de fijación individuales**

Se realizaron ensayos monotónicos con carga hasta el fallo en tornillos de 5 mm de y de diferentes longitudes (25 mm, 50 mm y 75 mm). Estos elementos de fijación se atornillaron en paneles de CLT perpendiculares al plano para examinar el comportamiento de un solo tornillo en diferentes condiciones de carga y la influencia de la longitud del tornillo. Cada elemento de fijación de prueba se sometió a una carga monótona hasta el fallo, de acuerdo con la norma EN 26891 [3.1] y cada muestra se preparó de acuerdo con la norma EN 1382 [3.6]. Treinta muestras de ensayo (por cada ensayo, 10 por cada longitud de tornillo) fueron sometidas a pruebas de tensión bajo carga de tracción, treinta pruebas para la aplicación de una carga de corte perpendicular a la fibra (capa más externa) y treinta pruebas de aplicación de una carga de corte paralela a la fibra. Las probetas se anclaron al banco de pruebas de ensayo mediante placas de acero y barras roscadas. Los ensayos monotónicos se llevaron a cabo mediante carga controlada por desplazamiento a una velocidad que variaba entre 0,05 y 0,2 mm. El último valor del desplazamiento y el último valor de la carga se determinan como el desplazamiento en el momento de la rotura, un desplazamiento correspondiente al 80% de la carga máxima o un desplazamiento límite de rotura de 30 mm, lo que ocurra primero.

### **Pruebas de conexión cíclica entre la pared y el suelo**

Tanto en la carga de tracción como en la corte, la conexión se formó utilizando cuatro tornillos LBS de 5 mm de diámetro en la cara vertical y en la horizontal de los soportes, variando únicamente la longitud del tornillo. El montaje del ensayo de tracción y el montaje del ensayo de corte pueden verse en la ilustración 3.10 y 3.12 respectivamente. En los ensayos de tracción, los tornillos de la cara horizontal se someten a una carga de tracción y los tornillos de la cara vertical a una carga de corte. La configuración del ensayo de corte somete a cada tornillo a una carga de corte en las caras horizontal y vertical del soporte. Se utilizaron barras roscadas y placas de acero para anclar los elementos de CLT al marco de ensayo y a la cabeza de carga. Se siguió el procedimiento estándar para los ensayos cíclicos de las conexiones realizadas con fijaciones mecánicas, prescrito por la norma EN 12512 [3.2], con una tasa de desplazamiento de entrada que variaba de 0,05 a 0,2 mm/s. En primer lugar, se llevaron a cabo ensayos monotónicos para establecer el desplazamiento de fluencia predefinido de cada configuración de conexión. El desplazamiento cíclico se programó de acuerdo con la norma EN 12512, se aplica en función del valor medio del desplazamiento de fluencia o deslizamiento obtenido en los ensayos monotónicos. Todos los ensayos cíclicos de corte se realizaron utilizando un procedimiento de carga cíclica inversa con los valores de fluencia predefinidos. Todos los ensayos cíclicos de tracción se sometieron a una modificación no invertida del procedimiento descrito en la norma EN 12512. El desplazamiento se realizó cíclicamente desde cero hasta un valor positivo (tracción) sin necesidad de inducir valores negativos (compresión).

▪ **Resultados**

**Prueba monótona en las conexiones entre la pared y el suelo:**

• **Resultados del ensayo de tensión de los tornillos (tracción)**

Para esta prueba, todas las muestras de ensayo fallaron por la retirada del tornillo del panel CLT, independientemente de la longitud de este. Como se ve en la Figura 10 (b), el comportamiento carga-desplazamiento fue lineal hasta que se alcanzó la carga de fluencia. A partir de ahí, la carga sigue aumentando hasta que se alcanza la carga máxima, seguida de una disminución de la carga hasta el fallo final.

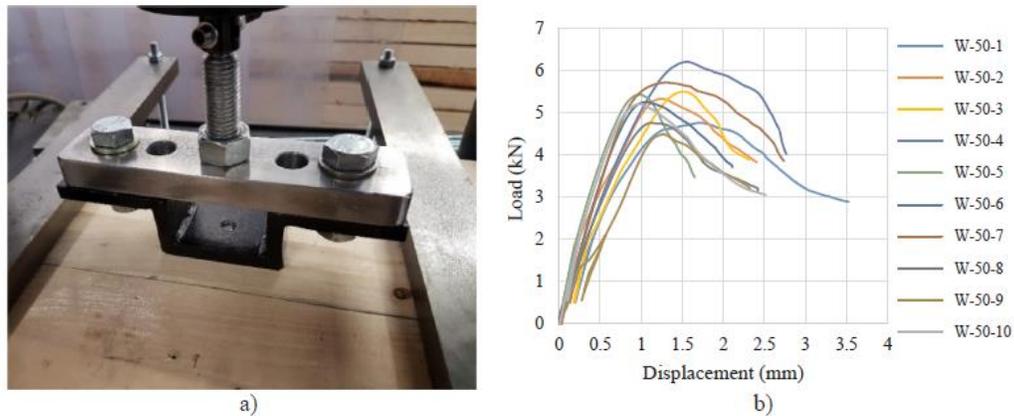


Figura 10 Ensayo de tracción: (a) montaje del ensayo de tracción (probeta W-50-10) antes del ensayo, (b) comportamiento carga-desplazamiento de los ensayos de tracción con tornillos de 50 mm.

• **Resultados del ensayo de corte de los tornillos**

Los modos de fallo en los ensayos de corte de los tornillos individuales se asemejaron al modo de fallo "e" mediante el empotramiento y la cesión del tornillo en todos los casos para los tornillos de 50 mm y 75 mm de longitud. Los tornillos de 25 mm se asemejaron al modo de fallo "a" sin que el tornillo cediera.

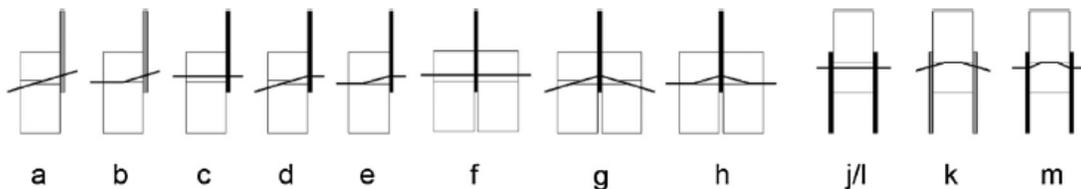


Figura 11 Modos de fallo de las conexiones acero-madera según Eurocode 5

Los resultados experimentales muestran un aumento de la carga máxima media de la longitud del tornillo, independientemente de la orientación de la fibra. Se observaron tendencias similares para la carga media de fluencia y la carga de rotura.

Los valores medios de ductilidad son generalmente más bajos para los tornillos cargados perpendicular a la fibra, además la ductilidad resultó ser mayor para los tornillos cargados en corte en comparación con los tornillos cargados en tensión

Para los tornillos cargados en corte se produjo una deformación significativa después del punto de fluencia antes del fallo. Los tornillos cargados en tensión fueron menos dúctiles que los cargados en corte, con una caída significativa de la carga después de alcanzar su fuerza máxima.

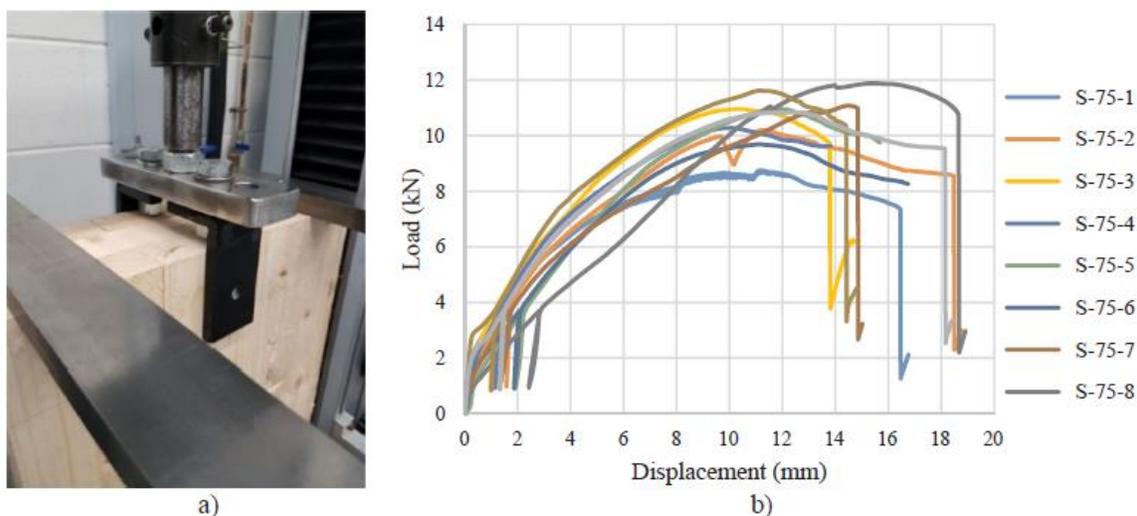


Figura 12 Ensayo de corte: (a) montaje de ensayo de corte con carga paralela a la fibra, (b) comportamiento carga-desplazamiento de los ensayos de corte con tornillo de 75 mm paralelo a la fibra.

### **Prueba cíclica en las conexiones entre la pared y el suelo**

- **Resultados de las pruebas de conexión a tensión**

Todas las pruebas cíclicas en las muestras de tensión demostraron el fallo de los tornillos en el lado del suelo de la conexión debido al desplazamiento vertical del panel. Este comportamiento se observó en todas las muestras, independientemente de la longitud de los tornillos. Se pudo observar una importante deformación por flexión en él, pero en general, el fallo se produjo por la retirada del tornillo del panel o por el desgarramiento de la cabeza del tornillo, o por una combinación

de retirada y flexión de este. Este comportamiento es comúnmente visto en las conexiones típicas de los soportes cuando se someten a situaciones de carga de tensión.

Los valores medios de ductilidad de la conexión para todas las longitudes de los elementos de fijación fueron bastante similares y no parece haber ninguna influencia de la longitud del elemento de fijación. El factor medio de degradación de la resistencia también parece permanecer relativamente constante independientemente de la longitud del tornillo, con valores de 0,91, 0,89 y 0,91 para fijaciones de 25 mm, 50 mm y 75 mm de longitud, respectivamente.

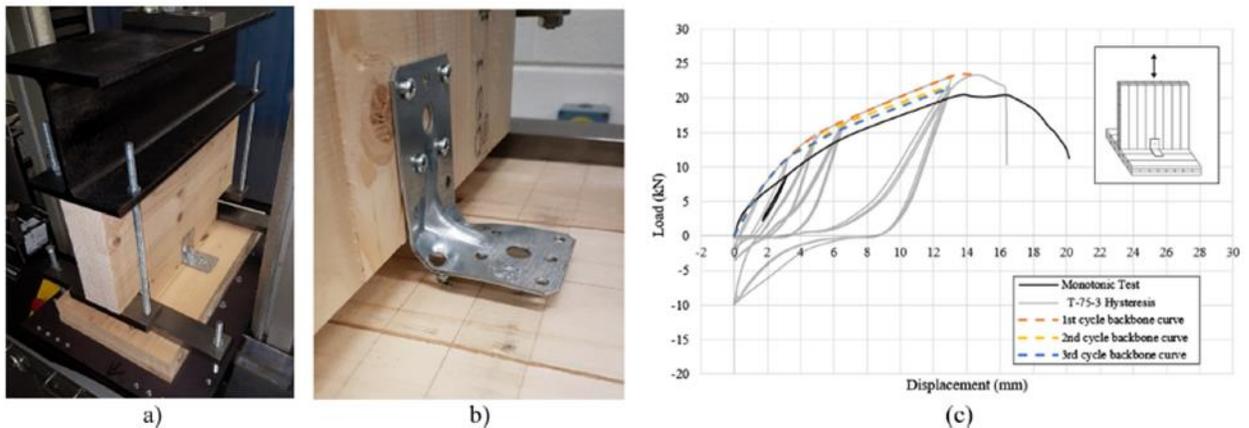


Figura 13 Ensayo de conexión cíclica de CLT a tracción, (a) montaje del ensayo de conexión de CLT, (b) comportamiento típico de retracción, (c) bucle de histéresis de la probeta de ensayo a tracción, T-75-3, con las curvas “backbone” asociadas y la curva de ensayo

- **Resultados de los ensayos de conexión a cortante**

En las muestras de conexión cortante, se observó la deformación del soporte de acero en el lado del suelo y de la pared de cada conexión, lo que produjo, debido al pandeo local, un fallo del soporte y del tornillo. También se observó la flexión de los tornillos tanto en el lado del suelo como en el de la pared de cada conexión. Para los tornillos de 25 mm de longitud, el fallo se debió al empotramiento y a la retirada. Para los tornillos de 50 mm y 75 mm de longitud, se observó un fallo por flexión, además de un fallo por empotramiento y retirada.

Al igual que los resultados de la conexión a tracción, la carga media máxima de fallo de la conexión de corte aumenta con el incremento de la longitud del tornillo. La rigidez elástica fue similar para todas las longitudes de los elementos de fijación ensayados.

## Anexos

El factor medio de degradación de la resistencia se mantiene relativamente constante independientemente de la longitud del tornillo, con valores de 0,81, 0,84 y 0,82 para los tornillos de 25 mm, 50 mm y 75 mm de longitud respectivamente.

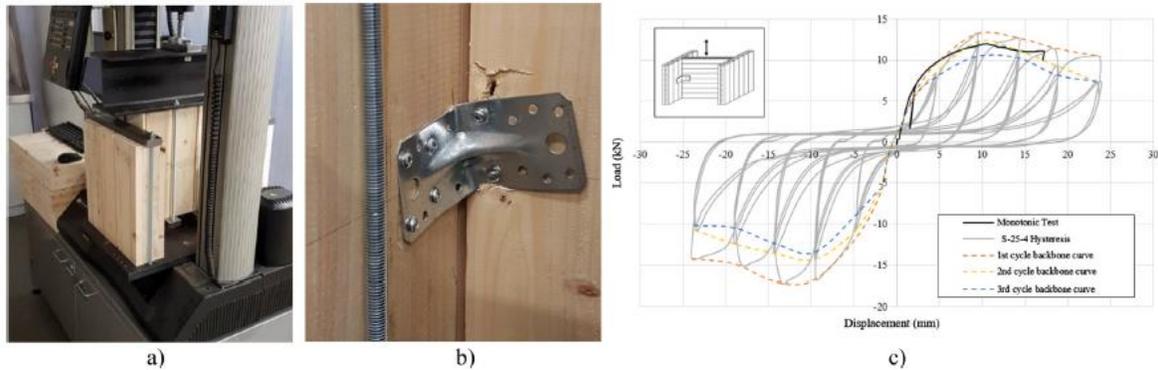


Figura 14 Ensayo cíclico de conexión a cortante del CLT, (a) montaje del ensayo de conexión del CLT, (b) comportamiento típico de empotramiento y retracción, (c) bucles de histéresis de la probeta de ensayo a cortante, S-25-4, con las curvas de fondo asociadas y

### ▪ Conclusiones

En el caso de los elementos de fijación individuales, se observó una tendencia al aumento de la carga (máxima, fluencia y rotura) con el incremento de la longitud del tornillo.

En los ensayos de corte de elementos de fijación individual, se obtienen mejores resultados de capacidad de carga si las fijaciones están perpendiculares a la fibra del panel CLT.

Se observa que los índices de falla siguen siendo para la dirección de la fibra, en este caso en paralelo la conexión de las fijaciones con el panel CLT.

### ▪ Principales normas utilizadas en el artículo.

[3.1] CEN. EN 26891. Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics (ISO 6891:1983). Belgium: Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium; 1991.

[3.2] CEN. EN 12512. Timber Structures – Test methods – Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium; 2005.

[3.3] Sikora KS, McPolin DO, Harte AM. Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in vending and shear. *Constr Build Mater* 2016; 116:141–50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145>.

[3.4] ETA-11/0030. European Technical Assessment. Screws for use in Timber Construction. ETA-Denmark, Nordhavn, Denmark; 2016.

[3.5] ETA-09/0323. Three-dimensional nailing plate (Angle brackets for timber-to-timber or timber-to-concrete or steel connections). ETA-Denmark, Nordhavn, Denmark; 2014.

[3.6] CEN. EN 1382. Timber Structures - Test methods - Withdrawal capacity of timber fasteners. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium; 2016.

## **ANEXO 4: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 4**

### **▪ Identificación**

#### **“Prueba experimental del efecto de acoplamiento en las uniones angulares de CLT”**

Jingjing Liu, Frank Lam, “Experimental test of coupling effect on CLT angle bracket connections”, *Engineering Structures* 171 (2018), pp. 862–873

### **▪ Descripción**

En este trabajo se investiga el efecto de acoplamiento de las cargas axiales y laterales de las uniones de ángulos de refuerzos con paneles CLT. Se realizaron ensayos monotónicos y cíclicos de las uniones cortantes, con diferentes niveles de fuerza constante aplicada en tensión simultáneamente. Se ensayaron a cuatro niveles de diferentes de fuerzas de tensión y los resultados se analizaron en términos de características mecánicas.

El experimento se llevó a cabo para las típicas conexiones de ángulos de CLT disponibles en el mercado. Se ensayaron las conexiones de acero entre la base y el panel, que representan la conexión de los paneles de pared con los cimientos. Las pruebas de conexión se realizaron bajo cargas monótonas y cíclicas biaxiales, de corte y de tensión.

### **▪ Materiales Utilizados**

Paneles CLT de madera SPF clasificada n° 1/2 de dimensiones 450 x 600 mm<sup>2</sup>, formado por 5 capas con un grosor de 169 mm. Para este experimento los paneles CLT tienen una temperatura controlada de 20°C y de una humedad relativa del 12%.

Los ángulos de refuerzo se ensayaron utilizando 11 tornillos de 4 × 60mm y 3 pernos de 12mm de diámetro (grado 8.8).

### **▪ Configuración y montaje**

Todos los ensayos de corte se realizaron mediante un procedimiento cíclico inverso con valores de fluencia predefinidos que variaban de una configuración a otra, dependiendo de los valores experimentales de fluencia obtenidos en los ensayos monotónicos. El montaje para estos ensayos se puede entender en la siguiente ilustración.

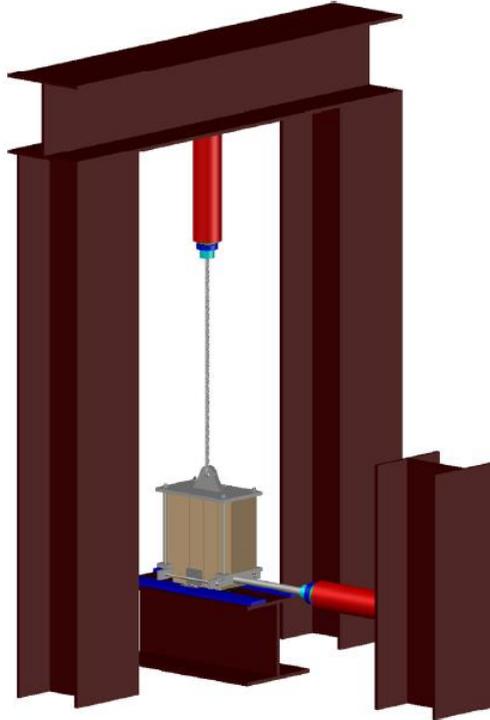


Figura 15 Dibujo esquemático en 3D del montaje.

Primero se aplicó una carga de tensión constante y se mantuvo en las muestras hasta el valor objetivo con el actuador vertical bajo control de carga. Posteriormente, se aplicó un desplazamiento lateral monótono o cíclico. Los ensayos monótonos se realizaron bajo control de desplazamiento a una velocidad de carga de 0,2 mm/s. Los ensayos cíclicos siguieron un procedimiento modificado basado en la norma EN 12512 [4.1] para ensayos cíclicos de uniones realizadas con fijaciones mecánicas, con una tasa de desplazamiento de entrada 0,8 mm/s para que la duración de cada ensayo no superara el límite de tiempo de 30 min.

Para evaluar el efecto de la carga de tensión en el comportamiento de corte de los ángulos de refuerzo, se ensayaron las conexiones de los soportes bajo con 4 niveles de carga de tensión en el plano (0 kN, 20 kN, 30 kN y 40 kN). Estos valores se seleccionaron en función de la capacidad de tracción de los ángulos de refuerzo. Para cada configuración se realizó una prueba monótona y tres o seis pruebas cíclicas. Para nivel 0 kN de fuerza de tensión, se realizaron tres ensayos cíclicos debido a la estabilidad del rendimiento en este nivel. Para el nivel 20 y 30 kN, se realizaron seis ensayos cíclicos para obtener resultados más estables. Para el nivel 40 kN, sólo se realizaron tres pruebas cíclicas.

## Anexos

En total, se realizaron 22 pruebas. Las probetas se denominaron según las siguientes reglas: "T" significa "carga de tensión constante"; el número después de "T" significaba "valor de carga de tensión constante"; "C" y "M" significaban "C" y "M" significan "carga cíclica" y "carga monótona", respectivamente. después de "C" o "M" significa "la numeración de la muestra". En la siguiente tabla 3 se ordenan las pruebas realizadas y el tipo de fallo, que corresponden a cesión del tornillo, rotura del tornillo, fractura de la placa de acero, torsión de la placa de acero y aplastamiento de la madera.

Failure mode	Specimen
Nail yielding	T0C1, T0C2, T0C3, T0M1, T20C1, T20C2, T20C3, T20C4, T20C6, T30C2, T30C4, T30C6
Nail breakage	T20C5, T30C1, T30C5, T40C3
Steel plate fracture	T30C3
Steel plate torsion	T20M1, T30M1
Wood crushing	T40M1, T40C1, T40C2

▪ **Resultados**

Para diferentes niveles de carga vertical constante, las formas de deformación de los ángulos de refuerzo en el desplazamiento lateral máximo varían 36 mm, como se muestra en Figura 16. Sin carga de tensión, la principal deformación se produjo en la interacción entre los tornillos y la madera empotrada. Al aumentar la carga de tensión, la placa de acero conectada al panel de madera se estiró significativamente en la esquina. Esto se debe a que la placa de acero en esta zona soporta la carga total de tensión, mientras que la parte superior de la placa de acero solo soportaba la carga de tensión parcialmente transferida de los tornillos. Los lados exteriores no pueden moverse horizontalmente, sino que se inclinan hacia arriba debido a la fuerza de levantamiento. Mientras tanto, la mayor carga axial coexistente conducía a un estiramiento más severo de la parte superior de la placa de acero.

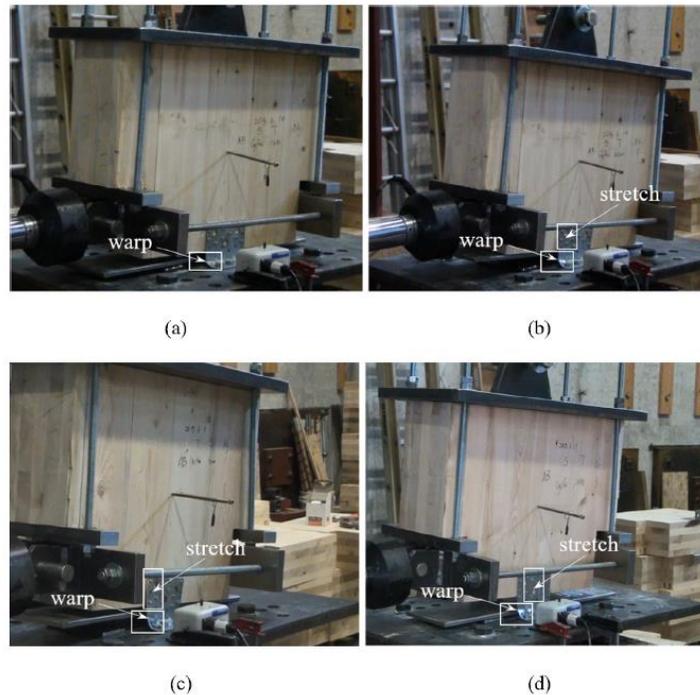


Figura 16 Formas de deformación de las probetas al máximo desplazamiento lateral para diferentes niveles de carga vertical: (a) 0 kN; (b) 20 kN; (c) 30 kN; (d) 40 kN.

Para los niveles de carga vertical de 0 kN y 20 kN la mayoría de los especímenes fallaron debido a la cesión de los tornillos que conectan soporte angular a la madera (Figura 17 (a)). Cuando se aplicó una carga vertical mayor, se produjeron fallos como la rotura de los tornillos, la fractura de la placa de acero y el aplastamiento localizado de la madera. Las roturas de los tornillos se

produjeron cuando la fuerza de corte sobre cada tornillo igualó la capacidad de corte de su sección (Figura 17 (b)). La placa de acero alrededor de los tornillos se desgarró debido a la concentración de esfuerzos de tensiones, por lo que la sección transversal de la placa de acero se redujo, lo que condujo a su fractura (Figura 17 (c)). Por un lado, los tornillos incrustados en la madera y por el otro los tornillos extraídos, se observó una torsión significativa de la placa de acero de los soportes (Figura 17 (d)).

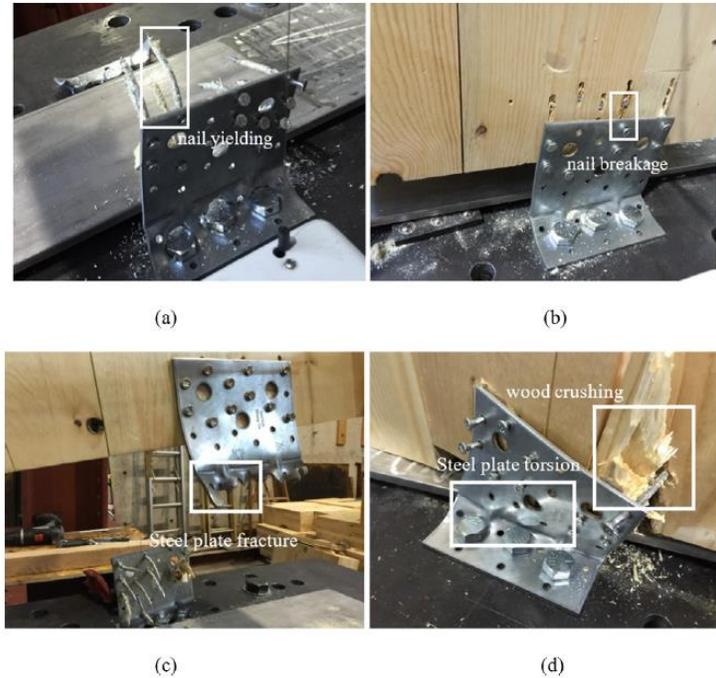


Figura 17 Modos de fallo en el último desplazamiento: (a) cesión de los tornillos; (b) rotura de los tornillos; (c) fractura de la placa de acero; (d) aplastamiento localizado de la madera y torsión de la placa de acero.

#### ▪ Conclusiones

Se llevó a cabo un programa de ensayos para estudiar el efecto de acoplamiento de la carga de corte y la carga de tracción para las conexiones típicas de CLT con soportes angulares. Se analizó el modo de fallo y la curva carga-desplazamiento.

Los resultados muestran que el comportamiento cortante y de tracción de los ángulos de refuerzos están fuertemente acoplados. La carga de tensión coexistente debilitó el comportamiento cortante de los conectores (resistencia, disipación de energía y estabilidad). La

carga de tensión coexistente debilitó la resistencia al corte, ya que también presionó los tornillos a la madera empotrada. Los tornillos pueden soportar más corte, sin embargo, la carga axial coexistente disminuyó la capacidad de disipación de energía.

- **Principales normas utilizadas en el artículo.**
- [4.1] EN 12512:2006. Timber structures—test methods—cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN); 2006.

## **ANEXO 5: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 5**

### **▪ Identificación**

#### **“Ductilidad y exceso de resistencia de las conexiones de sujeción de CLT clavadas”**

Wenchen Dong, Minghao Li, Lisa-Mareike Ottenhaus, Hyungsuk Lim, “Ductility and overstrength of nailed CLT hold-down connections”, Engineering Structures 215 (2020), pp. 110667

### **▪ Descripción**

En el presente informe se evaluó el comportamiento estructural de los sistemas de conexión “Hold-Down” (sistemas de sujeción verticales) utilizados en muros de CLT, bajo cargas monótonas y cíclicas. Se analizaron parámetros críticos de rendimiento de la conexión, la resistencia, la rigidez y la ductilidad.

Se realizaron pruebas de 68 muestras para 3 formas de conexión, con 2 tipos de Hold-Down y 2 tipos de CLT.

### **▪ Materiales Utilizados**

- Paneles CLT de madera de abeto “Douglas-fir” (DF) y pino radiata (RP), de grado SG8 [5.1], en sus distintos tipos de conexión fueron de 3 y 5 capas con espesores de 35 mm/35 mm/35 mm para los CLT de 3 capas y 35 mm/20 mm/20 mm/20 mm/35 mm para los CLT de 5 capas.
- Soporte tipo WHT440 [5.2], compuesto por placas de acero de 3 mm de espesor con treinta agujeros de 5 mm de diámetro.
- Chapa de acero grado 300 de 10 mm de espesor, bajo la norma AS/NZS 4671 [5.3]
- Clavos roscados de  $\varnothing 4 \times 50$ ,  $\varnothing 4 \times 60$ ,  $\varnothing 4 \times 100$  [5.4], estos clavos se introdujeron en los agujeros de los soportes siguiendo los patrones: clavado completo ("F") y dos patrones de clavado parcial ("P1" y "P2"). Ver figura 19

▪ **Configuración y montaje**

Se aprecia en la figura 4 los montajes de prueba de los tres tipos de sujeción. Estos montajes con los “Hold-Down” se basaron por la norma ASTM E2126 [5.5]. Para las uniones de Tipo A y Tipo B, los paneles de CLT se sujetaron con varillas de acero y placas de acero en su lugar, mientras que la carga se aplicó mediante un actuador conectado al soporte de sujeción mediante un perno de anclaje de 16 mm de diámetro. Un potenciómetro se montó en las muestras para medir el desplazamiento/deslizamiento relativo entre el soporte de sujeción y el CLT a lo largo de dirección de la carga vertical.

Para cada sujeción de tipo C, el actuador se conectó al panel de CLT con una placa de acero y 5 tacos de acero reforzados con tornillos autorroscantes. El extremo con las placas laterales de acero se fijó a la mesa de pruebas. También se montó un potenciómetro en cada espécimen de tipo C para medir el desplazamiento relativo entre las placas de acero y el CLT a lo largo de la dirección de carga.

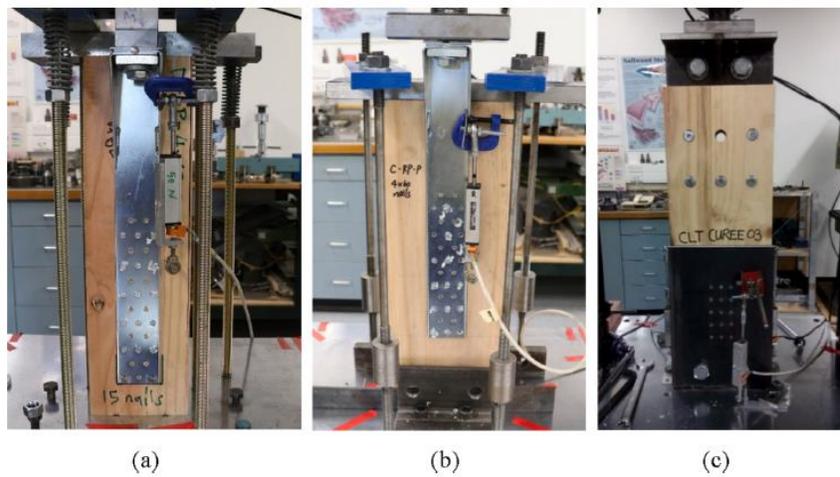


Figura 18 Tipos de montaje de sujeción conexión tipo (a) (b) y (c)

## Anexos

En los ensayos monótonos, el desplazamiento de carga controlada fue de 2-3 mm/min [5.6]. Para las pruebas cíclicas se aplicaron excursiones de desplazamientos positivos para simular las excitaciones sísmicas. Las amplitudes de los ciclos de carga se determinaron en base a los desplazamientos correspondientes a las cargas posteriores a la cresta, equivalentes al 80% de las cargas máximas obtenidas en los ensayos monótono. Las cargas cíclicas se aplicaron a una velocidad constante de 10 mm/min.

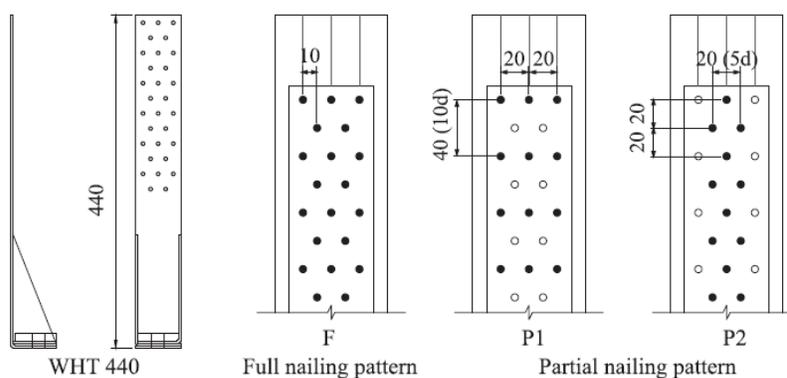


Figura 19 Soporte WHT440 y patrones de clavado en conexiones de sujeción tipo A y tipo B.

### **Conexiones de sujeción de tipo A**

Los soportes WHT440 se montaron sobre un panel CLT de 3 capas, utilizando clavos de  $\phi 4 \times 50$  o  $\phi 4 \times 60$ . Los clavos se introdujeron en los agujeros de los soportes siguiendo los patrones ("F" "P1" y "P2")

### **Conexiones de sujeción de tipo B**

Los soportes WHT440 se instalaron sobre un panel CLT de 3 capas, utilizando 15 clavos de  $\phi 4 \times 50$  o  $\phi 4 \times 60$ . Sólo se adoptó el patrón de clavado parcial "P1", para estudiar la influencia de la especie de madera en el rendimiento de la conexión.

### **Conexiones de sujeción de tipo C**

Se instalaron placas laterales de acero de 10 mm de grosor con agujeros pretaladrados de 5 mm de diámetro sobre CLT RP de 5 capas utilizando 15 clavos de  $\phi 4 \times 100$ . Una de las razones para utilizar placas de acero más gruesas era evitar el fallo de fractura de los soportes de sujeción. Los clavos más largos  $\phi 4 \times 100$  se utilizaron para garantizar una longitud de empotramiento de

## Anexos

clavos suficiente y evitar la retirada de los clavos en las primeras etapas. Se utilizaron dos patrones de clavado diferentes (apretado y ancho).

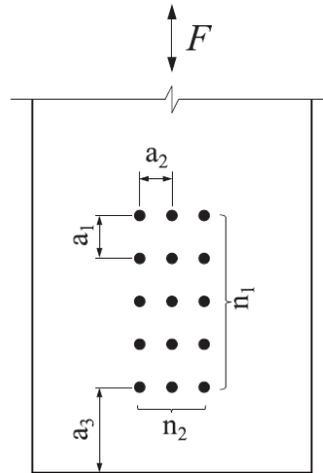


Figura 20 Definiciones de los parámetros de separación de clavos en las conexiones de sujeción de tipo C.

▪ **Resultados**

El modo de fallo dominante de las conexiones de sujeción de tipo A con el patrón de clavado completo "F" fue la fractura del soporte, como se muestra en Figura 21. La fractura por tracción de los soportes se produjo generalmente en las filas de clavos superiores, que eran responsables de soportar mayores cargas que otras filas de clavos. Además, debido a la excentricidad de la carga, los soportes se deformaron fuera del plano como se muestra en la Figura 21 (b). La combinación de altas tensiones de tracción y de flexión en las secciones transversales de los soportes condujeron finalmente al fallo por fractura.

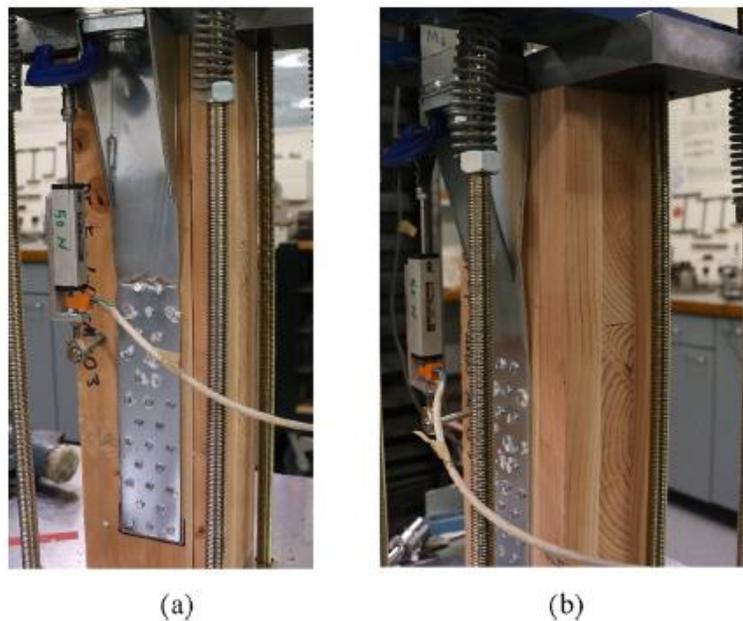


Figura 21 Modos de fallo típicos en las uniones de sujeción de tipo A con patrón de clavado completo "F": (a) Fractura del soporte, y (b) Deformación por flexión del soporte.

Las uniones de tipo A y tipo B con los patrones de clavado parcial, fallaron debido a la retirada de los clavos y al corte de la cabeza de los clavos (Figura 22(a)) con la flexión del soporte (Figura 22 (b)). Como el número de clavos se redujo a la mitad con respecto al patrón de clavado completo, el rendimiento de la conexión de sujeción se rigió por el comportamiento estructural de los clavos. En general, se observó un comportamiento dúctil de los clavos caracterizado por una fuerte flexión de su vástago y el aplastamiento de la madera empotrada, lo que finalmente condujo al fallo de cesión de los clavos.

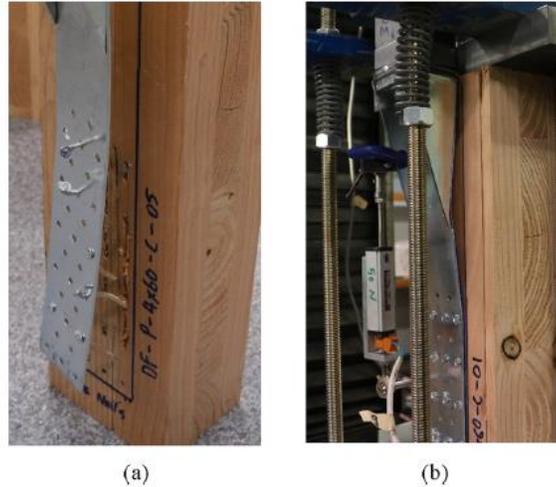


Figura 22 Modos típicos de fallo en conexiones de sujeción de tipo A y tipo B con patrones de clavado parcial: (a) Retirada del clavo y corte de la cabeza, y (b) Deformación por flexión del soporte.

En las uniones de tipo C con una amplia separación entre clavos, los modos de fallo típicos fueron el corte de la cabeza del clavo (Figura 23 (a)) y el aplastamiento de la madera (Figura 23 (b)) porque las placas de acero de 10 mm de espesor eran suficientemente fuertes y rígidas. Dado que el tamaño de los clavos era de  $4 \times 100$  y la longitud de empotramiento de los clavos era suficiente, no era fácil la retirada de los clavos bajo cargas monótonas y cíclicas. Por lo tanto, el modo de fallo dominado fue el corte de la cabeza del clavo después de que los clavos se doblaran significativamente.

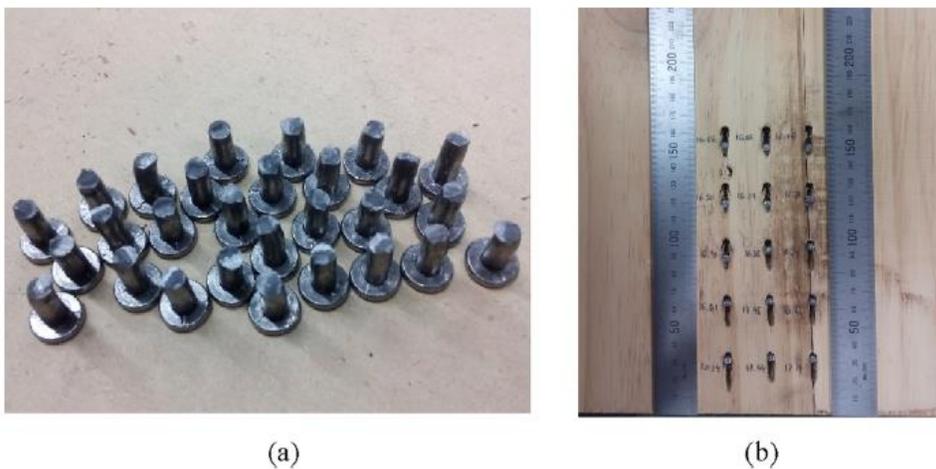


Figura 23 Modos típicos de fallo en las uniones de sujeción de tipo C con una amplia separación entre clavos: (a) Corte de la cabeza del clavo, y (b) Aplastamiento de la madera.

## Anexos

Las uniones de tipo C con una separación estrecha entre los clavos fallaron normalmente debido a la cesión de los clavos (Figura 24 (a)) y al desgarro del grupo (Figura 24 (b)). A medida que se reducía la distancia entre clavos, se desencadenaba el fallo por corte de la madera a lo largo de la dirección de carga. Este modo de fallo podría afectar a la ductilidad de la conexión y a la disipación de energía.

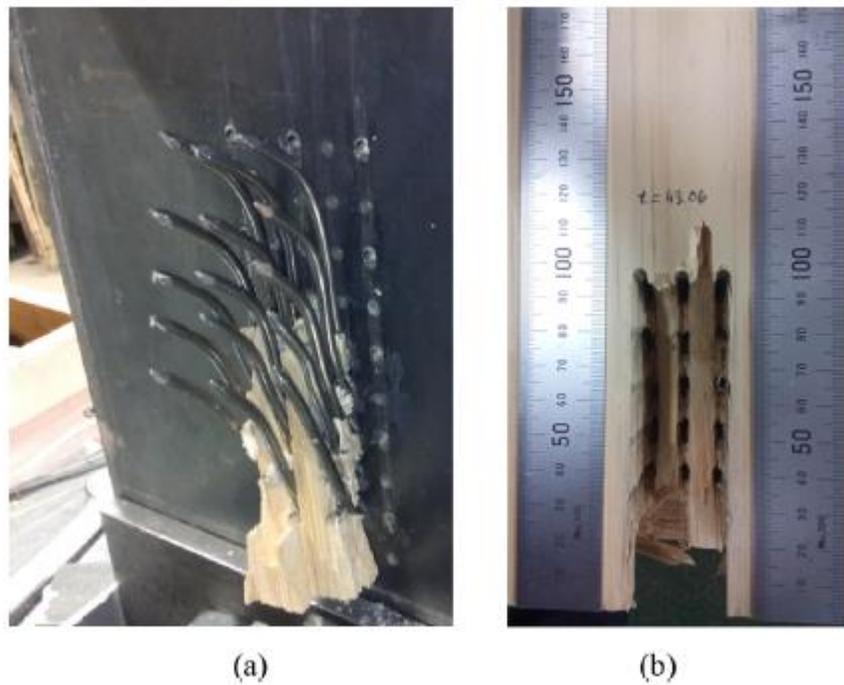


Figura 24 Modos típicos de fallo en las uniones de sujeción de tipo C con una distancia reducida entre clavos: (a) Cesión por flexión del clavo, y (b) Arranque del grupo.

### ▪ Conclusiones

Las dos longitudes de clavos provocaron una resistencia a la fluencia y una ductilidad similares. Los resultados de los ensayos indicaron que el efecto de las especies en el rendimiento de la conexión se hacía más evidente a medida que aumentaba la longitud de los clavos.

En el caso de las uniones de sujeción de tipo C, la ductilidad de los ensayos monótono fue similar a la obtenida de los ensayos cíclicos. Sin embargo, para las uniones de sujeción de tipo A y B la ductilidad cíclica media fue superior a la ductilidad monotónica en un rango. El límite

elástico medio de sujeción de los ensayos monótonos fue similar al obtenido en los ensayos cíclicos.

▪ **Principales normas utilizadas en el artículo.**

[5.1] EN 14358, 2016. Timber structures –Calculation and verification of characteristic values. European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgium.

[5.2] Rothoblaas. WHT Angle bracket for tensile loads. Cortaccia, Italy: Rothoblaas design manual; 2019.

[5.3] AS/NZS 4671:2001, 2001. Steel Reinforcing Materials. Standards New Zealand, Wellington, New Zealand

[5.4] Rothoblaas. Threaded nail – Screw with cylindrical head for plates. Cortaccia, Italy: Rothoblaas design manual; 2018.

[5.5] ASTM E2126, 2011. Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings, ASTM International.

[5.6] Krawinkler, Parisi, F., Ibarra, L., Ayoub, A., and Medina, R. 2000. Development of a Testing Protocol for Wood Frame Structures. CUREE Publication No. W-02.

## **ANEXO 6: RECOPIACIÓN DE DATOS ARTÍCULO 6**

### **▪ Nombre**

#### **Comportamiento de carga-deslizamiento de las conexiones compuestas de acero y madera laminada cruzada (CLT)**

A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford, “Load-slip behaviour of steel-cross laminated timber (CLT) composite connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, 122 (2016), pp. 110-121

### **▪ Descripción**

La conexión de paneles de madera contra laminada (CLT) a vigas de acero mediante conectores mecánicos es un método atractivo y novedoso para desarrollar un suelo híbrido de acero-madera (STC) totalmente prefabricado y sostenible.

Este trabajo tiene como objetivo el estudio del comportamiento de la unión entre un panel CLT y una viga de acero, mediante ensayos de “push-out”, se llevaron a cabo en nueve grupos diferentes de ensayos de acero-CLT que comprenden dos paneles CLT conectados a una viga de acero.

Las pruebas se clasificaron en función del tipo de conectores y de la aplicación de fijaciones de placas de refuerzo para reforzar los paneles CLT.

### **▪ Materiales Utilizados**

- Paneles CLT de madera de abeto de resistencia C24 acorde a [6.1], de dimensiones de 400 x 600 mm<sup>2</sup>, formado por 5 capas de tablas ordenados transversalmente de un espesor de 20 mm cada capa y 40 mm para la capa del medio (120 mm en total). La humedad relativa del panel es del 12%.
- Perfiles laminados en caliente de sección “I”, cumplen las especificaciones de la norma AS/NZS 3679.1 [6.2]
- Conectores de 2 tipos, pernos hexagonales de alta resistencia de grado 8.8 con diámetros de 12 mm y 16 mm que cumplen con los requisitos de la norma AS1110.1 [6.3] y AS1112.1 [6.4], y tornillos hexagonales con diámetros de 12 mm, 16 mm y 20 mm cumplen con los requisitos de la norma AS/NZS 1393 [6.5].

- Las placas de refuerzo se utilizaron para reforzar los paneles de CLT alrededor del orificio del conector y para mejorar la rigidez y la resistencia de la unión STC, de dimensiones de  $100 \times 50 \times 1$  mm, fabricadas con acero de grado G300.
- Epoxi de tipo gel, junto con tornillos de 16 mm, para proporcionar una acción compuesta completa entre los paneles de CLT y el perfil de acero.

#### ▪ **Configuración y montaje**

Los ensayos fueron especificados bajo la norma EN383-2007 [6.6], la configuración de los distintos ensayos se aprecia en la figura 25.

Los paneles de CLT y los perfiles de acero se perforaron previamente. En las uniones atornilladas, se utilizó una arandela de  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  para evitar el aplastamiento del CLT en la dirección perpendicular al plano de las láminas de madera.

El desplazamiento relativo entre los paneles de CLT y el perfil de acero se midió utilizando cuatro transformadores diferenciales variables lineales (LVDT) con una carrera máxima de 100 mm. Además, se utilizó un LVDT para medir el movimiento vertical del actuador de la máquina de ensayo y de los conectores.

En la conexión de acero-CLT pegadas, el adhesivo epoxi se aplicó en un área de  $450 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$  en la superficie de los paneles CLT y después de montar los paneles CLT, se dejó la muestra durante una hora y luego se instalaron los tornillos de 16mm. El espesor de la capa adhesiva después del secado era de unos 2 mm.

Para la conexión final se diseñó en los dos extremos de las vigas compuestas simplemente apoyadas una lámina de acero de  $50 \times 50 \times 5$  mm conectado al ala de la viga de acero mediante dos pernos de alta resistencia de grado 8.8 con agarre por fricción, pretensados al 60% de su carga de fluencia.

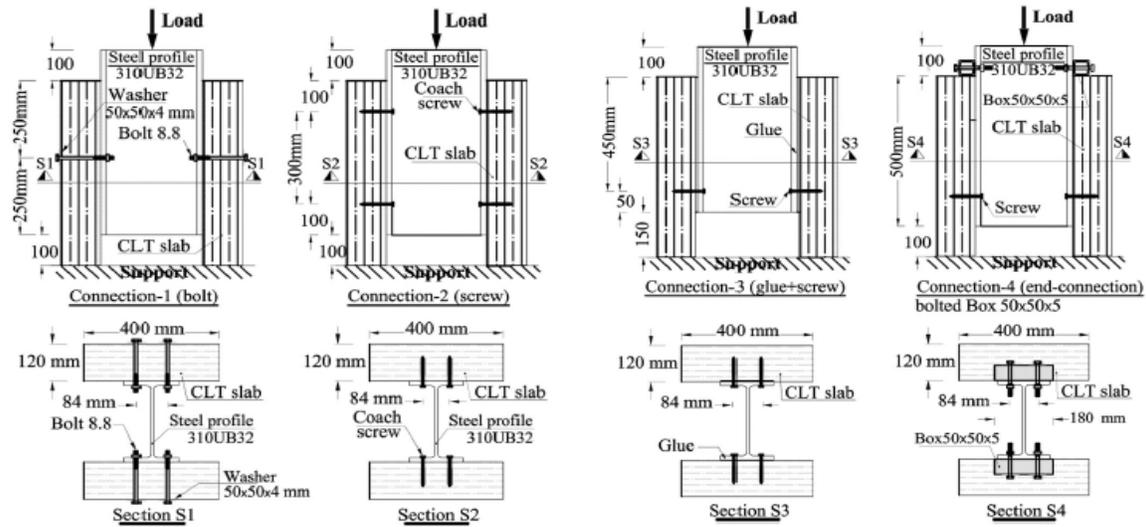


Figura 25 Configuración y sección transversal de los tipos de uniones de acero-CLT para ensayos de “push-out”

Las probetas se cargaron siguiendo el procedimiento especificado en el Eurocódigo para estructuras de madera [6.7]. En la Figura 26 se puede apreciar cómo fue aplicada la carga para todos los ensayos, donde  $F/F_{est}$  o  $F_u$ , es la última carga estimada. El procedimiento de carga en cada prueba se redefinió con respecto a la carga última ( $F_u$ ) observada en el ensayo anterior.

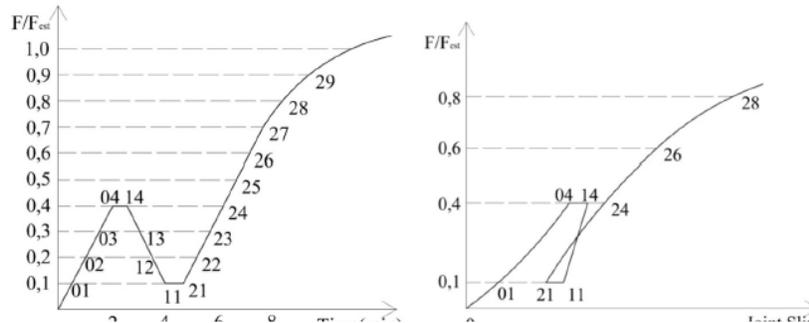


Figura 26 Procedimiento de carga adoptado para las pruebas de “push-out”.

▪ **Resultados**

Los modos de fallo en las fijaciones pueden clasificarse en 4 categorías, modos I, II, III y IV. En el modo de fallo I, sólo se produce el aplastamiento de la madera, sin ninguna deformación plástica en los elementos de fijación. En los modos de fallo II y III, se producen una y dos deformaciones plásticas dentro de los elementos de fijación, respectivamente. Además, en los modos de fallo II y III puede producirse un aplastamiento parcial de la madera alrededor de los conectores y en las láminas exteriores del CLT. Para el modo de fallo IV se asocia a la fractura de los conectores y aplastamiento en la madera. A continuación, en la Figura 27 se pueden observar los 3 primeros modos de fallos.

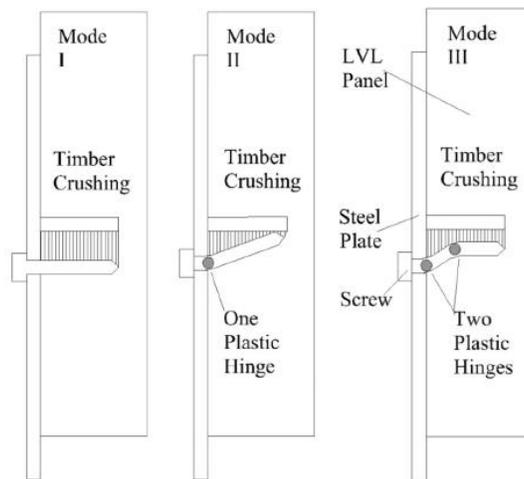


Figura 27 Características de los modos de fallo I, II y III observados en las uniones compuestas de acero-CLT

El modo de fallo dominante de las uniones compuestas de acero-CLT con tornillos de 12 mm (sin placa de refuerzo) que se ensayaron fue el modo III, mientras que para tornillos de 16 mm y 20 mm (sin placa de refuerzo) fue el Modo II.

En las uniones compuestas de acero-CLT con pernos (incluyendo el con conexiones de láminas de acero de  $50 \times 50 \times 5$  mm), el modo de fallo IV fue el modo dominante.

## Anexos

En la Figura 28 se puede apreciar las deformaciones plásticas de los conectores y el desgarro del panel CLT, donde en (a) existen 2 deformaciones plásticas, en (b) 1 deformación plástica, en (c) 1 deformación plástica y aplastamiento del panel CLT en dirección paralela a la fibra. Para los pernos (d) se encuentran deformaciones plásticas y fracturas en la cabeza y punta del perno, además de desgarro y punzonado en la madera en dirección perpendicular a la fibra.



Figura 28 (a) Modo de fallo de las uniones compuestas de acero-CLT con (a) Tornillo 12 mm, (b) Tornillo 16 mm (c) Tornillo 20 mm (d) Perno 12 mm y 16 mm.

El uso de placas de refuerzo para reforzar los paneles de CLT no alteró el modo de fallo de las uniones con tornillos, pero las placas de refuerzo redujeron ligeramente la ductilidad de las uniones.

La reducción de la ductilidad de las uniones con placas de refuerzo fue evidente por la repentina caída de la carga después de que se alcanzara la carga máxima. El modo de fallo utilizando placas de refuerzo se asoció a la rotura de la placa, al aplastamiento localizado de la madera y la formación de una o dos deformaciones plásticas en los tornillos, dependiendo del diámetro de estos.

## Anexos

Las uniones con tornillos y pegamento produjeron un modo de fallo repentino que se asoció con la fractura de los tornillos o del pegamento y la separación de los paneles CLT del perfil de acero.

En la Figura 29 se pueden apreciar en (a) la ruptura de la placa de refuerzo, las deformaciones plásticas de los tornillos y el aplastamiento de la madera. En (b) se aprecia la fractura en la conexión con pegamento.

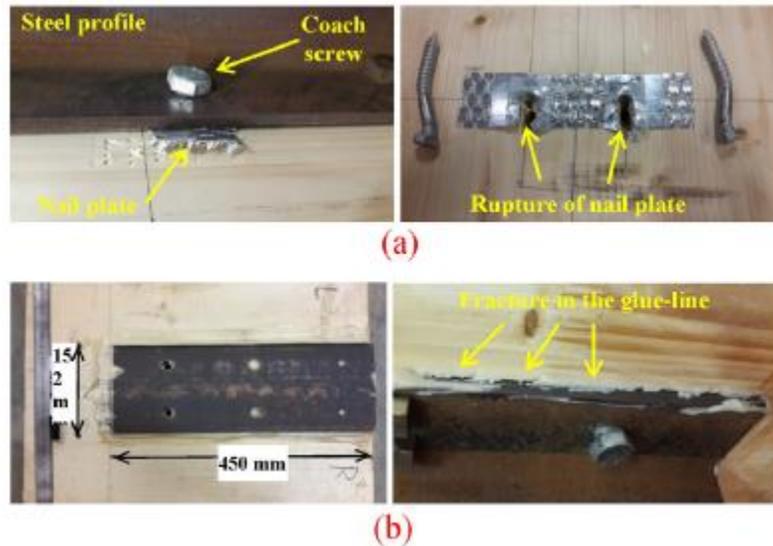


Figura 29 Modo de fallo para conectores con placas de refuerzo.

Cabe destacar que los perfiles de acero y los agujeros de los pernos o tornillos en la brida del perfil de acero no mostraron ningún signo de deformación durante o después del ensayo.

### ▪ Conclusiones

La respuesta carga-deslizamiento de las uniones atornilladas demostró un comportamiento dúctil, produciéndose después de un largo tramo post-pick. El aplastamiento local de la madera y el desarrollo de deformaciones plásticas en los tornillos provocan la falla. Las uniones atornilladas muestran una respuesta dúctil y la falla está asociada a la ruptura y a la caída repentina de la respuesta de deslizamiento de la carga.

Las uniones con pegamento son mucho más rígidas y resistentes que las uniones de tornillos y pernos, pero presentan un fallo frágil que no es deseable. El uso de conexiones con pegamento junto con los tornillos conduce a un comportamiento más dúctil de la conexión.

La conexión con pernos y la lámina de acero, demostró una rigidez y resistencia considerablemente mayores. Esta conexión puede utilizarse en vigas/suelos en los que se aplique un momento flector positivo sobre estos elementos. Las conexiones de tornillos y placas de refuerzo aumentan la rigidez y la resistencia inicial de las conexiones.

- **Principales normas utilizadas en el artículo.**

[6.1] British Standards Institute, BS EN 338: Structural timber - Strength Classes, 2009.

[6.2] Standards Australia, AS/NZS 3679.1:2010 Hot Rolled Bars and Sections, Standards Australia, 2012. (AS/NZS 3679.1, 2010)

[6.3] AS 1110.1, ISO Metric Hexagon Bolts and Screws-Product Grades A and B, 2000.

[6.4] AS 1112.1, ISO Metric Hexagon Nuts - Style 1 - Product Grades A and B, 2000.

[6.5] AS/NZS 1393, Coach Screws-Metric Series With ISO Hexagon Heads, 1996.

[6.6] BS EN383, Timber Structures - Test Methods - Determination of Embedding Strength and Foundation Values for Dowel Type Fasteners, 2007.

[6.7] BS EN 26891, Timber Structures – Joints Made With Mechanical Fasteners – General Principles for the Determination of Strength and Deformation Characteristics, 1991.

## ANEXO 7: TABLA DE PROPIEDADES PANEL CLT

EN 338:2003 (E)

Table 1 — Strength classes - Characteristic values

		Poplar and softwood species											Hardwood species						
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Strength properties (in N/mm <sup>2</sup> )																			
Bending	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70
Tension parallel	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42
Tension perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compression parallel	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34
Compression perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Shear	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Stiffness properties (in kN/mm <sup>2</sup> )																			
Mean modulus of elasticity parallel	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20
5% modulus of elasticity parallel	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Mean shear modulus	$G_{mean}$	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25

Table 1 (continued)

Density (in kg/m <sup>3</sup> )																			
Density	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900
Mean density	$\rho_{mean}$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080
NOTE		a Values given above for tension strength, compression strength, shear strength, 5% modulus of elasticity, mean modulus of elasticity perpendicular to grain and mean shear modulus, have been calculated using the equations given in annex A b The tabulated properties are compatible with timber at a moisture content consistent with a temperature of 20°C and a relative humidity of 65% c Timber conforming to classes C45 and C50 may not be readily available.																	

## ANEXO 8: VIGA DE ACERO “HOT ROLLED” SECCION I

Table 9 Universal Beams – Dimensions and Properties

Designation	Depth of Section	Flange		Web Thickness	Root Radius	Depth Between Flanges	Gross Area of Cross Section			About x-axis				About y-axis				Torsion Constant	Warping Constant	Designation		
		Width	Thickness				$A_g$	$I_x$	$Z_x$	$S_x$	$r_x$	$I_y$	$Z_y$	$S_y$	$r_y$	$J$	$I_w$					
				$d$	$b_f$	$t_f$												$t_w$	$r_1$	$d_1$	$t_w$	$2t_f$
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup> mm <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> mm <sup>3</sup>	mm	10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup> mm <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> mm <sup>3</sup>	mm	10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>			
610UB 125	611.6	229.0	19.6	11.9	14.0	572.4	48.1	5.54	16000	986	3230	3680	249	39.3	343	536	49.6	1560	3450	610UB 125		
	113	607.0	228.0	17.3	11.2	14.0	572.4	51.1	6.27	14500	875	2880	3290	246	34.3	300	469	48.7	1140	2980		113
	101	602.0	228.0	14.8	10.6	14.0	572.4	54.0	7.34	13000	761	2530	2900	242	29.3	257	402	47.5	790	2530		101
530UB 92.4	533.0	209.0	15.6	10.2	14.0	501.8	49.2	6.37	11800	554	2080	2370	217	23.8	228	355	44.9	775	1590	530UB 92.4		
	82.0	528.2	209.0	13.2	9.6	14.0	501.8	52.3	7.55	10500	477	1810	2070	213	20.1	193	301	43.8	526	1330		82.0
460UB 82.1	460.4	191.0	16.0	9.9	11.4	428.4	43.3	5.66	10500	372	1610	1840	188	18.6	195	303	42.2	701	919	460UB 82.1		
	74.6	457.4	190.0	14.5	9.1	11.4	428.4	47.1	6.24	9520	335	1460	1660	188	16.6	175	271	41.8	530	815		74.6
	67.1	453.8	190.0	12.7	8.5	11.4	428.4	50.4	7.15	8580	296	1300	1480	186	14.5	153	238	41.2	378	708		67.1
410UB 59.7	406.4	178.0	12.8	7.8	11.4	380.8	48.8	6.65	7640	216	1060	1200	168	12.1	135	209	39.7	337	467	410UB 59.7		
	53.7	402.6	178.0	10.9	7.6	11.4	380.8	50.1	7.82	6890	188	933	1060	165	10.3	115	179	38.6	234	394		53.7
360UB 56.7	358.6	172.0	13.0	8.0	11.4	332.6	41.6	6.31	7240	161	899	1010	149	11.0	128	198	39.0	338	330	360UB 56.7		
	50.7	355.6	171.0	11.5	7.3	11.4	332.6	45.6	7.12	6470	142	798	897	148	9.60	112	173	38.5	241	284		50.7
	44.7	352.0	171.0	9.7	6.9	11.4	332.6	48.2	8.46	5720	121	689	777	146	8.10	94.7	146	37.6	161	237		44.7
310UB 46.2	307.2	166.0	11.8	6.7	11.4	283.6	42.3	6.75	5930	100	654	729	130	9.01	109	166	39.0	233	197	310UB 46.2		
	40.4	304.0	165.0	10.2	6.1	11.4	283.6	46.5	7.79	5210	86.4	569	633	129	7.65	92.7	142	38.3	157	165		40.4
	37.0	298.0	149.0	8.0	5.5	13.0	282.0	51.3	8.97	4080	63.2	424	475	124	4.42	59.3	91.8	32.9	86.5	92.9		37.0
250UB 37.3	256.2	146.0	10.9	6.4	8.9	234.4	36.6	6.40	4750	55.7	435	486	108	5.66	77.5	119	34.5	158	85.2	250UB 37.3		
	31.4	251.6	146.0	8.6	6.1	8.9	234.4	38.4	8.13	4010	44.5	354	397	105	4.47	61.2	94.2	33.4	89.3	65.9		31.4
	25.7	248.0	124.0	8.0	5.0	12.0	232.0	46.4	7.44	3270	35.4	285	319	104	2.55	41.1	63.6	27.9	67.4	36.7		25.7
200UB 29.8	207.0	134.0	9.6	6.3	8.9	187.8	29.8	6.65	3820	29.1	281	316	87.3	3.86	57.5	88.4	31.8	105	37.6	200UB 29.8		
	25.4	203.2	133.0	7.8	5.8	8.9	187.6	32.3	8.15	3230	23.6	232	260	85.4	3.06	46.1	70.9	30.8	62.7	29.2		25.4
	22.3	201.6	133.0	7.0	5.0	8.9	187.6	37.5	9.14	2870	21.0	208	231	85.5	2.75	41.3	63.4	31.0	45.0	26.0		22.3
	18.2	198.0	99.0	7.0	4.5	11.0	184.0	40.9	6.75	2320	15.8	160	180	82.6	1.14	23.0	35.7	22.1	38.6	10.4		18.2
180UB 22.2	179.0	90.0	10.0	6.0	8.9	159.0	26.5	4.20	2820	15.3	171	195	73.6	1.22	27.1	42.3	20.8	81.6	8.71	180UB 22.2		
	18.1	175.0	90.0	8.0	5.0	8.9	159.0	31.8	5.31	2300	12.1	139	157	72.6	0.975	21.7	33.7	20.6	44.8	6.80		18.1
	16.1	173.0	90.0	7.0	4.5	8.9	159.0	35.3	6.11	2040	10.6	123	138	72.0	0.853	19.0	29.4	20.4	31.5	5.88		16.1
150UB 18.0	155.0	75.0	9.5	6.0	8.0	136.0	22.7	3.63	2300	9.05	117	135	62.8	0.672	17.9	28.2	17.1	60.5	3.56	150UB 18.0		
	14.0	150.0	75.0	7.0	5.0	8.0	136.0	27.2	5.00	1780	6.66	88.8	102	61.1	0.495	13.2	20.8	16.6	28.1	2.53		14.0

## ANEXO 9: PROPIEDADES MECANICAS CONECTORES

Table 3 — Mechanical and physical properties of bolts, screws and studs

No.	Mechanical or physical property	Property class										
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9/ 12.9	
							$d \leq$ 16 mm <sup>a</sup>	$d >$ 16 mm <sup>b</sup>	$d \leq$ 16 mm			
1	Tensile strength, $R_m$ , MPa	nom. <sup>c</sup>	400		500		600	800		900	1 000	1 200
		min.	400	420	500	520	600	800	830	900	1 040	1 220
2	Lower yield strength, $R_{eL}$ <sup>d</sup> , MPa	nom. <sup>c</sup>	240	—	300	—	—	—	—	—	—	—
		min.	240	—	300	—	—	—	—	—	—	—
3	Stress at 0,2 % non-proportional elongation, $R_{p0,2}$ , MPa	nom. <sup>c</sup>	—	—	—	—	—	640	640	720	900	1 080
		min.	—	—	—	—	—	640	660	720	940	1 100
4	Stress at 0,0048 $d$ non-proportional elongation for full-size fasteners, $R_{pf}$ , MPa	nom. <sup>c</sup>	—	320	—	400	480	—	—	—	—	—
		min.	—	340 <sup>e</sup>	—	420 <sup>e</sup>	480 <sup>e</sup>	—	—	—	—	—
5	Stress under proof load, $S_p$ <sup>f</sup> , MPa	nom.	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970
		Proof strength ratio $S_{p,nom}/R_{eL,min}$ OR $S_{p,nom}/R_{p0,2,min}$ OR $S_{p,nom}/R_{pf,min}$	0,94	0,91	0,93	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,88
6	Percentage elongation after fracture for machined test pieces, $A$ , %	min.	22	—	20	—	—	12	12	10	9	8
7	Percentage reduction of area after fracture for machined test pieces, $Z$ , %	min.	—				52		48	48	44	
8	Elongation after fracture for full-size fasteners, $A_f$ (see also Annex C)	min.	—	0,24	—	0,22	0,20	—	—	—	—	—
9	Head soundness	No fracture										

Table 3 (continued)

No.	Mechanical or physical property		Property class										
			4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9/ 12.9	
							$d \leq 16 \text{ mm}^a$	$d > 16 \text{ mm}^b$	$d \leq 16 \text{ mm}$				
10	Vickers hardness, HV $F \geq 98 \text{ N}$	min.	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385	
		max.	220 <sup>c</sup>				250	320	335	360	380	435	
11	Brinell hardness, HBW $F = 30 D^2$	min.	114	124	147	152	181	245	250	286	316	380	
		max.	209 <sup>c</sup>				238	316	331	355	375	429	
12	Rockwell hardness, HRB	min.	67	71	79	82	89	—					
		max.	95,0 <sup>d</sup>				99,5	—					
	Rockwell hardness, HRC	min.	—				22	23	28	32	39		
		max.	—				32	34	37	39	44		
13	Surface hardness, HV 0,3	max.	—				—			390	435		
14	Non-carburization, HV 0,3	max.	—				h			h	h		
15	Height of non-decarburized thread zone, $E$ , mm	min.	—				$\frac{1}{2}H_1$			$\frac{2}{3}H_1$	$\frac{3}{4}H_1$		
	Depth of complete decarburization in the thread, $G$ , mm	max.	—				0,015						
16	Reduction of hardness after retempering, HV	max.	—				20						
17	Breaking torque, $M_b$ , Nm	min.	—				in accordance with ISO 898-7						
18	Impact strength, $K_{Iv}^{ij}$ , J	min.	—	27	—		27	27	27	27	k		
19	Surface integrity in accordance with		ISO 6157-1 <sup>l</sup>								ISO 6157-3		

<sup>a</sup> Values do not apply to structural bolting.

<sup>b</sup> For structural bolting  $d \geq M12$ .

<sup>c</sup> Nominal values are specified only for the purpose of the designation system for property classes. See Clause 5.

<sup>d</sup> In cases where the lower yield strength,  $R_{eL}$ , cannot be determined, it is permissible to measure the stress at 0.2 % non-proportional elongation  $R_{p0.2}$ .

<sup>e</sup> For the property classes 4.8, 5.8 and 6.8, the values for  $R_{p0.2}$  are under investigation. The values at the time of publication of this part of ISO 898 are given for calculation of the proof stress ratio only. They are not test values.

<sup>f</sup> Proof loads are specified in Tables 5 and 7.

<sup>g</sup> Hardness determined at the end of a fastener shall be 250 HV, 238 HB or 99,5 HRB maximum.

<sup>h</sup> Surface hardness shall not be more than 30 Vickers points above the measured base metal hardness of the fastener when determination of both surface hardness and base metal hardness are carried out with HV 0,3 (see 9.11).

<sup>i</sup> Values are determined at a test temperature of  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  (see 9.14).

<sup>j</sup> Applies to  $d \geq 16 \text{ mm}$ .

<sup>k</sup> Value for  $K_{Iv}$  is under investigation.

<sup>l</sup> Instead of ISO 6157-1, ISO 6157-3 may apply by agreement between the manufacturer and the purchaser.