

# UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Mg. Franco Benedetti L.

**“CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE  
UNIONES CLAVADAS MADERA-TABLERO EN SISTEMAS  
MARCO PLATAFORMA”**

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

**RODRIGO ANDRÉS CALLE MIRANDA**

Concepción, Mayo de 2019

## DEDICATORIA

A mis padres, Rodrigo y Carolina, y a mis hermanos Juan Pablo y Arístides, por haberme apoyado incondicionalmente en cada uno de mis 24 años, ser una familia en la que agradezco haber crecido en todo ámbito.

A mi pareja Fernanda Aguayo, por acompañarme y alegrar mis días durante estos últimos años, siendo una parte muy importante de mi vida.

A mi hijo Rodrigo, por haber llenado mi vida de amor y momentos de felicidad inolvidables, y motivarme a ser cada día un mejor padre y persona.

*Sin ustedes no sería lo que soy, les agradezco y los amo con todo mi corazón.*

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Bío-Bío, por permitir a sus estudiantes crecer como personas y como futuros profesionales, al contar con profesores de diversas culturas, pensamiento político y trayectoria, que a través de sus anécdotas y enseñanzas buscan el mejor futuro laboral para sus alumnos.

A mi profesor patrocinante, Franco Benedetti, por ayudarme, mostrar interés, y participar en cada etapa de esta investigación.

A los amigos que hice dentro de la carrera, que mejoraron cada día de clases y estudio, y que hicieron que mi paso por la universidad haya estado lleno de buenos momentos.

Al profesor Víctor Rosales y don Robinson Aguayo, del CATEM, por haber facilitado tanto materiales como herramientas para esta investigación, y haber colaborado en la fabricación de las probetas.

A José Luis Concha, y el profesor José Norambuena, por facilitar el laboratorio de materiales de la UBB y su ayuda en la realización de ensayos.

Al profesor Alan Jara tanto por su ayuda en la configuración de instrumentos, como por haber aportado con información útil y comparable que sirvió de referencia.

A Kevin Asparren, por haber sido la otra mitad de esta investigación, participando en cada etapa y colaborando en todo momento, como amigo e investigador.

A MASISA por haber puesto a disposición tableros OLB para esta investigación, y a Simpson Strong-Tie por su contribución con clavos anulares.

## **CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNIONES CLAVADAS MADERA-TABLERO EN SISTEMAS MARCO PLATAFORMA**

Rodrigo Calle Miranda

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

[rcalle@alumnos.ubiobio.cl](mailto:rcalle@alumnos.ubiobio.cl)

Mg. Franco Benedetti Leonelli

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

[fbenedet@ubiobio.cl](mailto:fbenedet@ubiobio.cl)

### **RESUMEN**

Hoy en día Chile requiere un compromiso con la sustentabilidad, donde la madera tome un rol como protagonista al menos en la construcción residencial. Para esto son indispensables las investigaciones que caractericen uniones, principales medios para la disipación de energía en la construcción en madera.

La presente investigación tuvo como objetivo caracterizar las uniones clavadas entre pie derecho y tablero de madera OSB y OLB, en el sistema marco plataforma. Específicamente, los elementos de unión corresponden a clavos anulares marca SIMPSON, y clavos helicoidales marca INCHALAM.

Antecediendo a la caracterización de las uniones propiamente tal, se realizaron ensayos de flexión a los elementos de fijación para obtener su tensión de fluencia en flexión, basado en la norma ASTM F1575-17, con el propósito de comparar el desempeño de los clavos de manera individual. Para la caracterización de la unión, se realizaron probetas conformadas por madera de pino radiata de 2"x6" de grado estructural C16, clavadas a tableros OSB de 11.1mm y OLB de 12mm, que fueron ensayadas siguiendo el protocolo CUREE, utilizando cargas cíclicas mediante una bomba manual y un pistón de doble efecto, y cuyas propiedades fueron calculadas a través de las disposiciones incluidas en la norma EN12512.

Los resultados muestran que el comportamiento tanto de clavos como de uniones realizadas con clavo anular, tienen mayor rigidez y resistencia que aquellas realizadas con clavos helicoidales. Además, se verificó un aumento en la resistencia y rigidez de aquellas uniones con clavos helicoidales cuando se trabajó con OLB, debido a la menor penetración con respecto al tablero de OSB.

Palabras clave: Sistema marco plataforma, clavos, uniones.

8290 Palabras Texto + 37 Figuras/Tablas\*250 = 17540 Palabras Totales.

## ABSTRACT

Nowadays, Chile requires a commitment with sustainability, where timber takes a leading role at least in residential construction. For this, investigations that characterize joints, main way for energy dissipation in timber construction, are indispensable.

This research had the main objective to characterize nailed joints between wall studs and wood OSB and OLB, in platform frame system. Specifically, the fasteners are SIMPSON brand annular ring nails, and INCHALAM helical nails.

Before the characterization of the nailed connections itself, bending tests were performed to the fasteners in order to obtain their bending yield strength, based on ASTM F1575-17 standard, with the purpose of making a comparison between the performance of the nails individually.

For the characterization of the joint, test tubes were made, conformed by 2"x6" Radiata Pine wood planks, structural grade C16, nailed to 11.1mm OSB LP brand, and 12mm OLB made by MASISA, that were tested following the CUREE (*Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering*) protocol, using cyclic load with a double effect manual hydraulic pump and a piston, and the mechanical properties were calculated through the directions included in the european standard EN 12512.

The results shows that the behaviour both of nails and nailed joints made with annularly threaded nail were more rigid and resistant than those made with helical nails.

Besides, an increase of strength and stiffness of the helical nail joints when worked with OLB were verified, due to less penetration respect to the OSB board.

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	6
<b>1.1 Justificación</b> .....	6
<b>1.2 Objetivos</b> .....	7
1.2.1 <i>Objetivo General</i> .....	7
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	7
<b>1.3 Metodología de Trabajo</b> .....	8
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	10
<b>2.1 La Madera, Propiedades Básicas</b> .....	10
<b>2.2 El Método Constructivo Marco Plataforma</b> .....	11
<b>2.3 Uniones Utilizadas en Marco Plataforma</b> .....	11
2.3.1 <i>Tipos de clavos para marcos de madera</i> .....	12
<b>2.4 Ensayos De Uniones En Madera</b> .....	13
<b>2.5 Investigaciones Previas</b> .....	14
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	16
<b>3.1 Materiales</b> .....	17
3.1.1 <i>Pie derecho de pino radiata</i> .....	17
3.1.2 <i>OSB (oriented strand board)</i> .....	17
3.1.3 <i>Clavo anular y helicoidal</i> .....	18
<b>3.2 Ensayo de Elementos de Unión</b> .....	18
3.2.1 <i>Maquinaria e instrumentación</i> .....	19
3.2.2 <i>Tensión de fluencia del acero <math>F_{yb}</math></i> .....	20
3.2.3 <i>Tensión de fluencia de clavos según la NCh 1198</i> .....	22
3.2.4 <i>Otras propiedades obtenidas a partir del ensayo de tensión de fluencia a flexión de clavos</i> .....	22
<b>3.3 Ensayo de Unión Pie Derecho-Tablero</b> .....	22
3.3.1 <i>Maquinaria e instrumentación</i> .....	22
3.3.2 <i>Protocolo CUREE</i> .....	24
3.3.3 <i>Probetas de ensayo</i> .....	25
3.3.4 <i>Propiedades mecánicas</i> .....	26
3.3.5 <i>Degradación de la rigidez y deterioro de la resistencia</i> .....	27
3.3.6 <i>Propiedades teóricas y de diseño</i> .....	28
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	30
<b>4.1 Tensión de Fluencia en Flexión de Clavos</b> .....	31

<b>4.2 Ensayo Mecánico de la Unión</b> .....	33
4.2.2 <i>Propiedades mecánicas</i> .....	33
4.2.3 <i>Degradación de la rigidez y deterioro de la resistencia</i> .....	37
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	40
<b>5.1 Conclusiones Sobre los Ensayos de Flexión en Elementos de Unión</b> .....	40
<b>5.2 Conclusiones Sobre la Evaluación del Comportamiento de Uniones ante Cargas Cíclicas</b> .....	40
<b>5.3 Recomendaciones</b> .....	41
<b>6. REFERENCIAS</b> .....	43
<b>7. ANEXOS</b> .....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación de los ejes de la madera (Fritz, 2004).....	10
Figura 2 Diferencias entre el sistema balloon frame y marco plataforma (Kat Levine, 2010) .....	11
Figura 3 (a) Clavo anular (b) Clavo helicoidal (c) Clavo liso .....	13
Figura 4 Curva típica del ciclo histerético (Dolan, 1984) .....	14
Figura 5 Dimensiones de elementos de unión (cedida por INCHALAM) .....	18
Figura 6 Disposición experimental y protocolo según ASTM-F1575 .....	19
Figura 7 Maquina de compresión automática (izquierda) y datalogger (derecha).....	20
Figura 8 Curva carga-desplazamiento y carga de fluencia P (ASTM F-1575) .....	21
Figura 9 Instrumentación utilizada para el ensayo de unión .....	23
Figura 10 Disposición del sistema de ensayo de probetas .....	23
Figura 11 Protocolo de carga CUREE básico simplificado controlado por deformación.....	25
Figura 12 Dimensiones de las probetas.....	26
Figura 13 Punto de fluencia según EN 12512.....	27
Figura 14 Determinación de la rigidez secante .....	28
Figura 15 Falla típica de los materiales utilizados .....	30
Figura 16 Curva carga-desplazamiento clavos helicoidales.....	32
Figura 17 Curva carga-desplazamiento clavos anulares .....	32
Figura 18 Comparación de Resistencia promedio.....	34
Figura 19 Comparación Resistencia subciclo de menor valor .....	34
Figura 20 Comparación Rigidez promedio .....	35
Figura 21 Comparación Rigidez subciclo de menor valor.....	35
Figura 22 Comparación Ductilidad promedio.....	36

Figura 23 Comparación Ductilidad subciclo de menor valor.....	36
Figura 24 Degradación de la rigidez configuración OSB-Clavo anular.....	37
Figura 25 Deterioro de la resistencia configuración OSB-Clavo helicoidal .....	37
Figura 26 Deterioro de la resistencia configuración OLB-Clavo anular.....	37
Figura 27 Deterioro de la resistencia configuración OLB-Clavo helicoidal.....	38
Figura 28 Deterioro de la resistencia de la envolvente de 1eros,2dos, y 3eros ciclos para todas las configuraciones .....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Configuraciones de probetas .....	16
Tabla 2 Propiedades físicas pie derecho .....	17
Tabla 3 Propiedades físicas OSB .....	17
Tabla 4 Propiedades físicas OLB .....	18
Tabla 5 Propiedades físicas del elemento de unión.....	18
Tabla 6 Configuraciones de probetas .....	25
Tabla 8 Tensión de fluencia en flexión experimental y teórica de los clavos ensayados.....	32
Tabla 9 Valores promedio de propiedades mecánicas de los clavos.....	33



## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Chile, concordando con la tendencia mundial, se está buscando potenciar soluciones constructivas eficientes, sustentables y renovables. Es en este contexto donde la construcción con madera como material principal ha ganado importancia.

La utilización de madera genera beneficios no solo económicos, sino que también posee ventajas antes de su puesta en obra: captación de CO<sub>2</sub> atmosférico y regulación del ciclo hidrológico; durante la edificación: permite montajes rápidos, eficientes y en ausencia de agua, además de entregar una correcta resistencia, bajo peso específico y flexibilidad en la construcción; e incluso después de la vida útil de la construcción: puede servir como materia prima para tableros o vigas reconstituidas, ser valorizado energéticamente, o simplemente ser convertida en humus gracias a su biodegradabilidad.

El sistema constructivo marco plataforma es el sucesor del antiguo entramado ligero “balloon frame”, y es ampliamente utilizado en pequeña y mediana altura para construcciones residenciales en países como Estados Unidos, Canadá, Suecia, Noruega y Australia, donde la construcción con madera como material principal llega casi al 90%. Por contraparte, en Chile el año 2013 la construcción de viviendas con madera como material principal alcanzaba alrededor de un 20% (González, 2013), y para el año 2016 el mismo indicador llegó a un 34% (Santa María et al., 2017). Para la Corporación Del Fomento (CORFO), una de las metas de su programa estratégico mesoregional es aumentar en un 30% el número de viviendas que se construyen en madera para el año 2030.

Entre las razones que limitan la construcción de mediana altura con madera se encuentra la deformación que presenta ante cargas sísmicas, ya que, a pesar de su buen desempeño, la NCh433 impone un desplazamiento del entrepiso (drift) máximo de 0.2% de la altura del entrepiso, la cual es un estándar inicialmente calibrado considerando edificios de hormigón armado.

### 1.1 Justificación

Hoy en día Chile es uno de los principales productores de madera a nivel mundial, donde los últimos 13 años, en promedio el 7.65% (detalle en anexo A) de las exportaciones totales del país corresponden al sector forestal (Instituto Forestal, 2018). Actualmente, se está realizando un esfuerzo por parte del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) a través de la Universidad Católica y la Universidad del Bío-Bío, para modificar las normas de diseño y construcción de

edificaciones de madera (NCh 433 y NCh 1198) calibrando los factores de desempeño sísmico como el drift y el factor de modificación de respuesta R, al mismo tiempo que incluir disposiciones que permitan conocer las deflexiones y capacidades resistentes de muros de corte y diafragmas de entrepiso con distintos espaciamientos de clavos.

Las construcciones de madera están formadas por piezas unidas entre sí. Las uniones entre piezas son un elemento importante a considerar, debido a que pueden ser el punto de falla de una estructura, además de representar hasta un 25% del costo total de la estructura (Arriaga et al., 2015). Cuando se construye en madera, las clavijas (clavos, tornillos y grapas) corresponden al principal tipo de unión mecánica. El esfuerzo se transmite de una pieza a otra mediante corte y flexión del clavo, provocando también tensiones de aplastamiento en la madera.

Dentro de los elementos de unión mecánicos se encuentran los clavos, elementos delgados y alargados que corresponden a la unión mecánica más común utilizada en madera, y existen de diversos tipos, destacando los clavos lisos, anulares y helicoidales. En esta investigación se analizaron los de tipo anular y helicoidal, descartando las uniones con clavos lisos por estar ampliamente estudiadas y normadas, y por la baja resistencia a la extracción directa que presentan. Los clavos, al ser el tipo de unión habitual entre tablero y el entramado de madera, constituye uno de los puntos de mayor importancia en la seguridad estructural (Lomagno & Gotelli, 2003). En una investigación acerca del huracán Andrew, Keith y Rose (Keith & Rose, 1994) concluyeron que el punto de inicio de la falla de más de 60.000 viviendas seriamente afectadas, fueron las uniones clavadas entre los tableros y la madera de la cubierta en los techos.

## **1.2 Objetivos**

### *1.2.1 Objetivo General*

Caracterizar el comportamiento mecánico de uniones clavadas entre elementos del bastidor de madera y tablero en sistemas de entramado ligero marco plataforma.

### *1.2.2 Objetivos Específicos*

- 1.- Sintetizar el estado del arte respecto a ensayos de probetas entre pie derechos de madera y tableros arriostrantes, unidas mediante clavos.
- 2.- Obtener las propiedades mecánicas de los elementos de unión – clavos anulares y helicoidales – mediante ensayos de flexión basados en normativas vigentes.

3.- Ejecutar ensayos de carga cíclica a probetas construidas mediante la unión clavada de madera y tablero.

4.- Comparar los resultados de ambos tipos de unión entre sí, y con valores teóricos o de diseño propuestos por distintas normativas.

### **1.3 Metodología de Trabajo**

La investigación tuvo cuatro etapas principales, las cuales son:

La recopilación sobre información general acerca del sistema constructivo marco plataforma en madera, las características propias de los clavos que se usaron como elementos de fijación y el análisis de uniones entre pie derecho y tablero estructural, con lo cual se logró establecer y sintetizar el estado del arte.

Luego, se tomaron medidas de las máquinas de ensayo, para definir dimensiones tanto de las probetas como del sistema de sujeción entre probeta y máquina de ensayo. Se procedió a diseñar el sistema de sujeción, y finalmente se diseñaron las probetas a ensayar.

Para la tercera etapa, se calibró la bomba hidráulica utilizada como fuente de carga, se eligió realizar ensayos bajo carga cíclica debido a que la bomba entrega la opción de cargar en ambos sentidos, y como se discutió en el estado del arte, un ensayo cíclico entrega más información y es más acorde a la realidad a la que va a ser sometida la unión madera-tablero estructural.

Finalmente, se recopiló la información entregada por los ensayos, se confeccionaron gráficos y se calcularon las propiedades físicas de cada probeta según la norma EN12512, se procedió a comparar con estudios previos en condiciones similares, y teniendo toda esta información se logró realizar una conclusión.

A continuación, se puede observar la secuencia en la que se realizó esta investigación.



## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 La Madera, Propiedades Básicas

Para su uso estructural, Fritz (2004) explica que la madera se considera un material biológico, higroscópico y anisotrópico.

- Biológico: está compuesta principalmente por moléculas de celulosa, lignina y agua. Aun siendo elaborada, puede ser biodegradada por hongos e insectos taladradores como termitas. Por esto, deben tenerse una serie de consideraciones técnicas que garanticen su durabilidad en el tiempo.
- Higroscópico: tiene la capacidad de captar y ceder humedad en su medio, este proceso determina y provoca cambios dimensionales y deformaciones en la madera.
- Anisotrópico: Su comportamiento tanto físico como mecánico presentan resultados diferenciados según sea el plano que se considere respecto a la dirección longitudinal de sus fibras y anillos de crecimiento. En general, la madera resiste entre 20 y 200 veces más en el sentido del eje del árbol (paralelo a la fibra), que en el sentido transversal (perpendicular a la fibra).

Debido a este comportamiento, se han establecido:

- Eje tangencial: tangente a los anillos y perpendicular al eje longitudinal de la pieza.
- Eje radial: perpendicular a los anillos de crecimiento y al eje longitudinal.
- Eje axial o longitudinal: paralelo a la dirección de las fibras, perpendicular al eje formado entre el eje radial y tangencial.

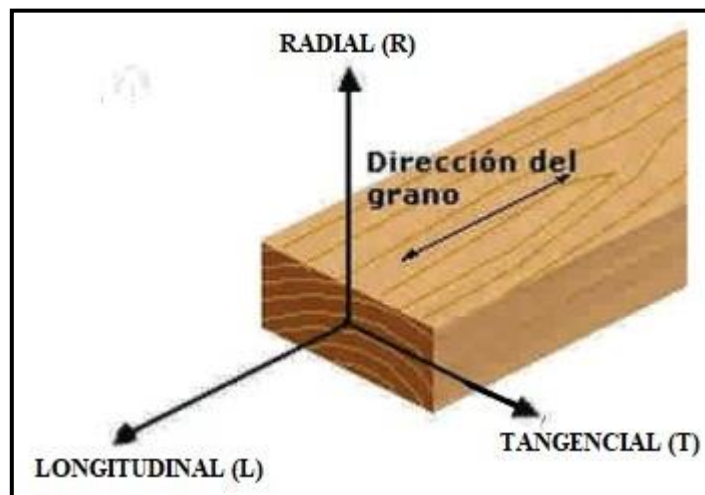


Figura 1 Representación de los ejes de la madera (Fritz, 2004)

## 2.2 El Método Constructivo Marco Plataforma

Según comenta Loferski (2015) en el foro IHF, el uso de entramados ligeros de madera surgió por su bajo peso comparado a los antiguos “marcos de madera pesada”. El primero fue denominado “balloon frame” o sistema de pie derecho continuo, cuya característica, como su nombre lo indica, era el uso de pies derechos continuos desde la solera basal hasta el techo, lo que complicaba la obtención de materiales y su traslado, puesto que incluso para una casa de 2 pisos, cada pie derecho tendría un largo entre 5.5 y 6 metros de longitud.

El sistema marco plataforma reemplazó al balloon frame, y es el método más utilizado hoy en día tanto en Chile como en los países líderes en construcción sustentable. Su diseño está conformado por muros de corte compuestos por pies derechos separados entre 40cm y 60cm, arriostrados por tableros estructurales mediante clavos, tornillos o grapas. Las losas se estructuran mediante vigas principales y secundarias, arriostradas de igual forma que los muros, generando diafragmas de piso. En el método de plataforma la estructura es levantada planta por planta, de forma que cada piso sirve como plataforma para la construcción del siguiente.

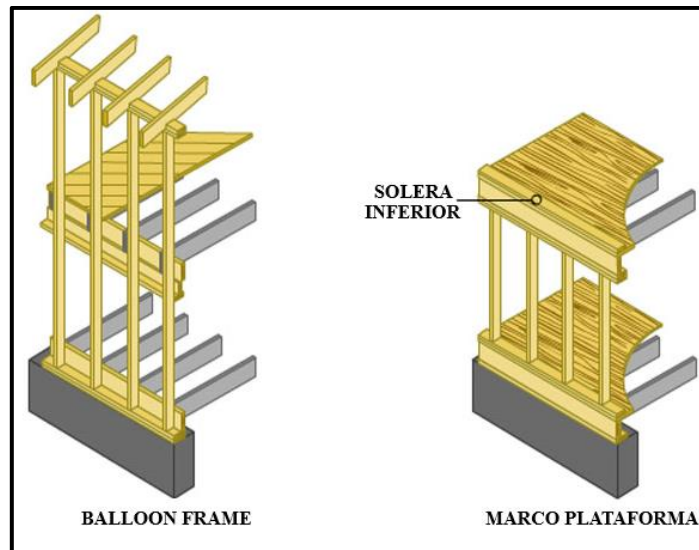


Figura 2 Diferencias entre el sistema balloon frame y marco plataforma (Kat Levine, 2010)

## 2.3 Uniones Utilizadas en Marco Plataforma

En toda construcción marco plataforma, se utilizan métodos de unión mecánicos para el arriostramiento de los elementos que conforman el marco. El mecanismo de traspaso de fuerzas se materializa por medio de un trabajo en flexión, aplastamiento o cizalle del medio de unión; y del aplastamiento, cizalle y hendimiento de la madera (Fritz, 2004).

Uno de los aspectos más importantes en los muros y diafragmas del entramado ligero es la unión entre el tablero y los elementos del marco. Las propiedades que tengan los elementos de unión van a afectar en la capacidad final del conjunto. Cambiar el tipo de clavo, diámetro, longitud, geometría o espaciamiento de clavado puede variar significativamente en la cantidad de carga soportante.

Como concluye Germano et al. (2015), los clavos en muros de corte son los principales encargados de la disipación de energía durante cargas sísmicas, llegando incluso a disipar más del 80% de la energía del sismo, y en el máximo de carga de corte, el desplazamiento horizontal entregado por la unión pie derecho – tablero representa el 75% del desplazamiento total, donde los conectores hold-down y angle brackets contribuyeron 15% y 4% del desplazamiento total respectivamente. Por este motivo, se hace necesario estudiar su comportamiento y considerar sus propiedades para un buen diseño de la unión.

### *2.3.1 Tipos de clavos para marcos de madera*

Cuando se construyen marcos de madera, los clavos que presentan un mejor comportamiento son los modelos anulares y helicoidales. A pesar de que la NCh 1198 Of.2014 considera para uniones clavadas solo el empleo de clavos comunes, para la construcción de mediana altura no se recomienda utilizar estos clavos, debido a que generan una resistencia muy baja a la extracción directa, y una menor resistencia a la extracción lateral que los diseños tanto anular como helicoidal. Según el estudio de Rammer et al. (2001), el orden de resistencia en uniones tablero-madera para un mismo diámetro, es clavo anular-helicoidal-liso, además de esto, los clavos anulares presentan la menor variabilidad (17-32%), seguidos por los clavos helicoidales (12-41%), y finalmente los clavos lisos presentan la mayor variación de resistencia entre sus pruebas (22-48%).

De acuerdo a Shadravan y Ramseyer (2018), la resistencia al corte de un muro de madera marco plataforma puede ser mejorada en un 13.2% si se cambia la unión entre pie derecho y OSB de clavo liso a clavo anular.

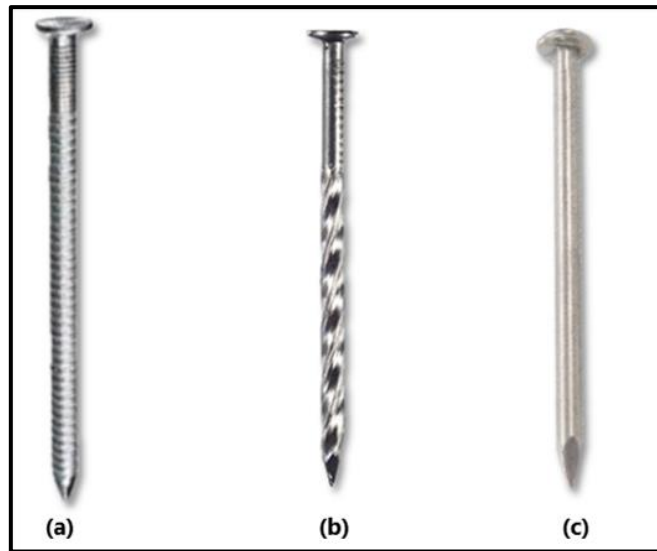


Figura 3 (a) Clavo anular (b) Clavo helicoidal (c) Clavo liso

## 2.4 Ensayos De Uniones En Madera

Cuando se desea caracterizar el comportamiento mecánico de uniones entre tablero y pie derecho, existen tanto ensayos de carga monotónica como ensayos de carga cíclica y carga dinámica.

Un ensayo de carga monotónica se emplea aplicando una carga que aumenta gradualmente desde cero hasta la rotura sin producirse descargas, en un sentido único.

El ensayo de carga cíclica alterna la carga en una misma dirección, pero hacia ambos sentidos, entregando un gráfico carga vs desplazamiento, llamado ciclo histerético, debido a que refleja la tendencia de la probeta a conservar su forma original en ausencia de la carga aplicada, tal como se puede apreciar en la figura 4.

Existen diversos protocolos de carga para ensayos cíclicos, que proponen tanto el ensayo de muros completos como el de pequeñas probetas representativas de las uniones. Para esta investigación se eligió el protocolo CUREE, debido a su amplia utilización y el hecho de contar con una simplificación que facilita el trabajo con una bomba hidráulica manual, tal como fue el caso.

Este tipo de ensayo se emplea para obtener el comportamiento histerético de la unión, y permite calcular valores más cercanos a la realidad de resistencia, ductilidad, rigidez y energía disipada.

Como concluye Dolan (1989), la prueba estática unidireccional (monotónica) no proporciona ninguna información sobre el comportamiento dinámico o cíclico de los muros de corte.

Además de esto, se hace recomendable realizar ensayos de carga cíclica, debido a que, entre los alcances de la NCh433, se indica que esta solo es aplicable a materiales o sistemas que tengan una norma técnica de diseño sísmico o que en su defecto se pueda demostrar mediante ensayos cíclicos



no lineales, que tienen resistencia y ductilidad equivalente a los requerimientos de la normativa para materiales sísmicos convencionales.

Dentro del protocolo CUREE, se detallan diversas formas de realizar los ensayos, donde corresponde aplicar a la investigación el ensayo cuasi-estático controlado por la deformación. Para lo anteriormente explicado existen tres historiales de carga: historial de carga básico, historial de carga básico abreviado, y el historial de carga básico simplificado.

Se seleccionó el historial simplificado porque es el más práctico de realizar con una bomba manual. Por otro lado, el método simplificado tiende a sobreestimar el daño generado por las cargas, particularmente para los ciclos de gran amplitud.

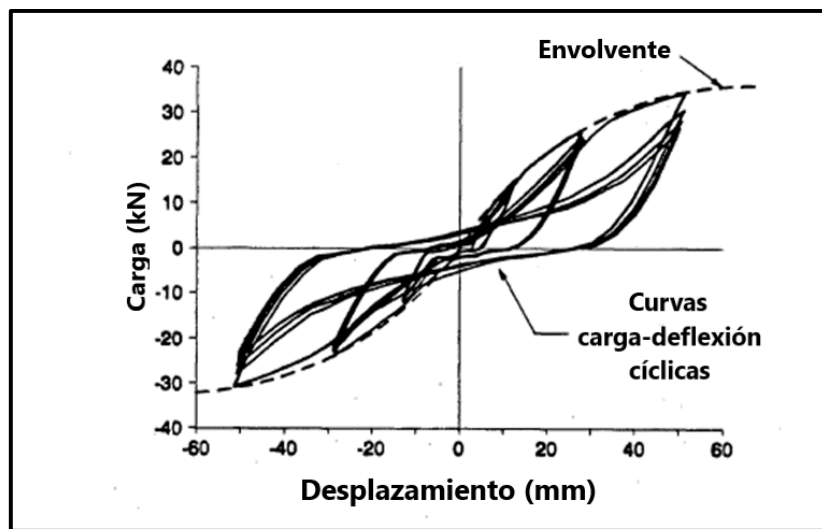


Figura 4 Curva típica del ciclo histerético (Dolan, 1984)

## 2.5 Investigaciones Previas

Debido a la relevancia de las uniones en construcciones con marco plataforma, se han realizado diversas investigaciones a lo largo del tiempo para lograr modelar y predecir el comportamiento de estructuras de madera.

Dentro del sistema constructivo, uno de los primeros estudios - documentados en internet - sobre diafragmas de madera fue utilizando contrachapados como arriostamiento a través de métodos dinámicos y estáticos (Countryman & Colbenson, 1954).

Para el caso de los muros de corte, las investigaciones pioneras se realizaron en la década de 1980, donde Dean et al. (1986) ensayaron 11 muros de corte a escala real mediante cargas cíclicas, monotónicas y con mesa vibradora, obteniendo la respuesta de clavos, conexiones de marcos y conexiones a la fundación.

Cuando Dolan (1989) investigó la respuesta dinámica de muros de corte, llegó a diversas conclusiones. La primera es que las uniones son la mayor fuente de disipación de energía debido a su comportamiento histerético, y en sus palabras, resulta evidente que el comportamiento del muro de corte completo está gobernado por el comportamiento histerético de las uniones clavadas individuales.

También concluyó que los factores principales que causan la pérdida de capacidad en los muros usando cargas cíclicas, fueron que los clavos eran extraídos durante los ciclos de mayor desplazamiento. Al suceder esto, cada vez hubo menos clavos que resistieran las cargas aplicadas. Por último, algunos de los clavos que experimentaron mayor deformación (ubicados en las esquinas de los paneles), fallaron antes de concluir el ensayo.

Recientemente se realizó una comparación entre ensayos monotónicos y cíclicos en muros marco plataforma, dando por resultado que prácticamente no hay diferencia en la capacidad de recibir carga en los ciclos iniciales entre ambos ensayos. Además, un test de carga cíclica puede reemplazar a los ensayos monotónicos y entregar resultados similares de capacidad de carga. Según concluyen, sería aceptable reemplazar el ensayo monotónico por ensayos cíclicos con el fin de obtener más información acerca de la capacidad de disipación de energía (Verdret et al., 2015).

También, cuando compararon ductilidades, comprobaron que el aumento de la velocidad de carga lleva a disminuir la ductilidad de las uniones en ensayos cíclicos.

Sartori y Tomasi (2013) ensayaron uniones pie derecho-tablero, llegando a la conclusión de que los clavos anulares se comportan de mejor manera que los lisos, y que el hecho de fijar dos tableros estructurales en solo un pie derecho, no influye en rigidez ni resistencia de las uniones.

Otra conclusión interesante, es que cuando se varía el espesor del OSB de 12mm a 15mm, no mejora la resistencia total en más de un 10%, lo cual se corrobora con estudios posteriores, como el de Catalán (2016) y el del Instituto Forestal (2016).

Entre las conclusiones de Shadravan y Ramseyer (2018), al investigar muros de corte sujetos a carga lateral, la resistencia al corte del muro mejora de las siguientes maneras: usar doble solera basal y disminuir el espaciamiento de los pernos de anclaje (122%), disminuir el espaciamiento de clavado del tablero OSB (28.3%), cambiar la unión entre pie derecho y OSB a clavo anular (13.2%), disminuir el espaciamiento entre pie derechos (5.8%).

En su investigación sobre el rol de los revestimientos estructurales de marcos de madera ligera, Germano et al. (2015) mostraron resultados en que las uniones realizadas con clavos anulares tuvieron una resistencia 1.75 veces mayor que las realizadas con clavos lisos, para el mismo

diámetro. Otro resultado fue que el daño resultante en los muros era repartido uniformemente entre los clavos a lo largo del marco, disipando alrededor del 80% de la energía total.

Para Johnson (2015), mientras las resistencias de corte presentadas en su estudio pueden considerarse adecuadas para propósitos estructurales en ciertas situaciones, remarca que los test monotónicos realizados para obtener dichos valores, no representan necesariamente valores de carga realistas para muros de corte. Concluye que deben realizarse ensayos dinámicos para obtener valores de diseño más típicos para cargas de muros de corte reales.

Finalmente, Fuentealba (2014) modeló muros de corte bajo carga monotónica, e hizo una comparación de costos asociados, concluyendo que cambiar la densidad de clavado de 15x30 (15 veces el espesor del tablero en los bordes y 20 veces en la zona central) a 10x20 utilizando el sistema de anclaje Simpson produce un aumento promedio de 12% (aumentando en un 1.1% el costo) , mientras que con anclaje de fierro estriado de 8mm la rigidez aumenta un 9% (2.1% más de costo) y Cambiar la placa OSB de 9.5mm a 11.1mm genera solo un 4.2% y un 2.6% de resistencia y costo adicional respectivamente.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

El plan experimental seguido durante la investigación consideró la realización de 10 ensayos de flexión a cada elemento de unión, para posteriormente realizar 6 ensayos para cada configuración de probetas, donde al menos una será destinada para ensayo de carga monotónica y como máximo 5 serán para ensayo de carga cíclica.

*Tabla 1 Configuraciones de probetas*

<b>Probetas</b>	<b>Número de ensayos</b>	
Clavo anular	10	
Clavo helicoidal	10	

<b>Configuración</b>	<b>OSB - Pino R.</b>	<b>OLB - Pino R.</b>
Clavo anular	6	6
Clavo helicoidal	6	6

### 3.1 Materiales

#### 3.1.1 Pie derecho de pino radiata

En nuestro país se utiliza el pino radiata debido a su gran producción como madera aserrada y a su bajo costo (CORMA, 2003). Debido a su disponibilidad, características físicas y comportamiento mecánico estructural, se ha convertido en la especie maderera más utilizada en la construcción.

Para el diseño de las probetas, se utilizaron piezas de madera de 2x6 pulgadas (41x138mm) en sus dimensiones nominales, los cuales representan a los pie derechos utilizados en la construcción con madera.

Se utilizó madera de pino radiata con grado estructural C16, con las propiedades físicas promedio mostradas:

Tabla 2 Propiedades pie derecho

Grado	Tensión admisible flexión (MPa)	Tensión admisible tracción paralela (MPa)	Tensión admisible compresión paralela (MPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de humedad (%)
C16	6.0	3.6	7.5	469.15	12.71

#### 3.1.2 OSB (oriented strand board)

El tablero de fibras orientadas (OSB por su sigla en inglés) es hoy en día el tablero estructural más usado para la construcción con madera, debido a sus propiedades mecánicas y su bajo costo con respecto a sus alternativas (Lomagno & Gotelli, 2003). Se utiliza como arriostre o revestimiento para la formación de muros, tabiques, pisos y techos.

Las propiedades físicas se muestran a continuación.

Tabla 3 Propiedades OSB

MOE paralela (kg/cm <sup>2</sup> )	MOR paralela (kg/cm <sup>2</sup> )	Extracción directa (N)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
35,26	191	89	700

#### 3.1.4 OLB (one layer board)

El OLB es un tablero de madera constituido por solo una capa. Actualmente se encuentra catalogado como un material no estructural, siendo útil para tabiques, revestimiento de muros y cielos, y cierres perimetrales.

Tabla 4 Propiedades OLB

Hinchamiento 24 hrs (%)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Máx 25	8±3	700±20

### 3.1.3 Clavo anular y helicoidal

Como se discutió en el apartado de estudios previos, los clavos son el principal material para la disipación de energía, y corresponden al método de fijación mecánica más común en el sistema marco plataforma.

Para esta investigación se analizaron las uniones realizadas con clavos tipo helicoidal de 63.5mm de largo y 3.05mm de diámetro marca INCHALAM, fabricado a partir de alambroón de acero al carbono 1021, y clavos anulares de 60mm de largo y 4.0mm de diámetro marca SIMPSON de acero electro-galvanizado.

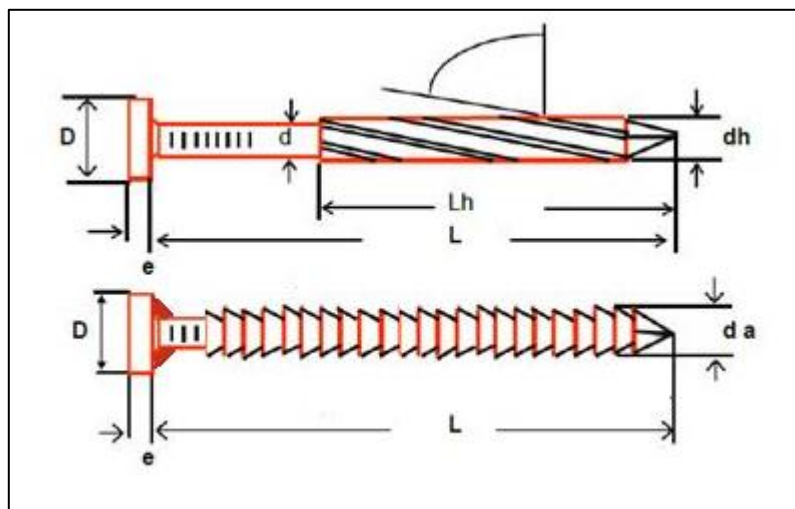


Figura 5 Dimensiones de elementos de unión (cedida por INCHALAM)

Tabla 5 Propiedades físicas del elemento de unión

Clavo	L (mm)	Lh (mm)	D(mm)	d (mm)	dh (mm)	da (mm)	e
Helicoidal	63.5	43	7.1	3.05	3.5	-	≈ ½ d
Anular	60	-	8	4	-	4	≈ ½ d

### 3.2 Ensayo de Elementos de Unión

Para obtener la tensión de fluencia de los clavos, se realizó un ensayo de flexión siguiendo los pasos detallados en la normativa norteamericana ASTM F1575-17. Además de esto, se obtuvieron

valores de rigidez, resistencia y ductilidad, adaptados a las condiciones en que se realizaron los ensayos, y que no necesariamente representan los valores normados obtenidos a partir de ensayos de tracción.

El proceso de este ensayo está basado en la norma ASTM-F1575 “Standard Test Method for Determining Bending Yield Moment of Nails”. Esta norma estandariza el procedimiento para obtener el momento de fluencia en clavos sometidos a una carga estática. Para la obtención del momento de fluencia, los clavos fueron sometidos a un ensayo de flexión en tres puntos, esquematizado en la figura 6.

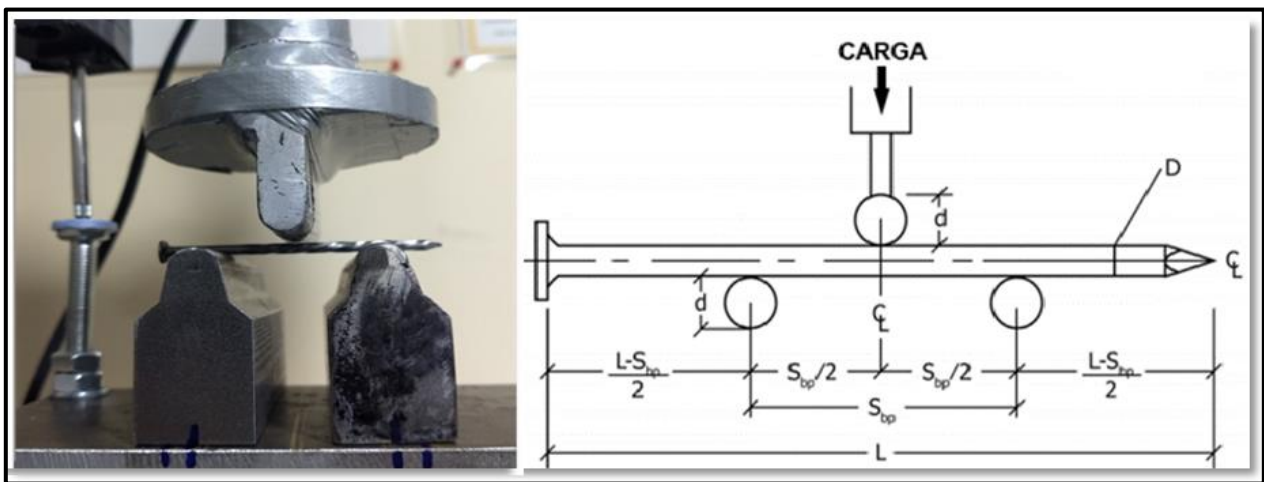


Figura 6 Disposición experimental y protocolo según ASTM-F1575

### 3.2.1 Maquinaria e instrumentación

Se utilizó para este ensayo una máquina de compresión automática marca Controls, modelo multispeed 34-v1074, que posee una capacidad de carga de 50KN y una velocidad máxima de 51mm/min. Las deformaciones producidas se midieron mediante un sensor de posición lineal LVDT (por su sigla en inglés).

Tanto la máquina de compresión como el sensor de posición están conectados a un datalogger marca Controls, modelo Digimax touch 82-p60r02, que registra los datos de carga y desplazamiento a lo largo de cada ensayo. En la figura 7 se presenta la maquinaria utilizada en los ensayos.



Figura 7 Máquina de compresión automática (izquierda) y datalogger (derecha)

Como se ve en el plano, el clavo se ubica entre dos apoyos cilíndricos, mientras se aplica la carga en un tercer cilindro equidistante a los apoyos. El diámetro  $D$  es estándar con un valor de 9.52mm y la separación entre apoyos es 46mm para los clavos anulares, y 36.6mm para los helicoidales. Los datos de carga y desplazamiento se recolectan desde el principio de ensayo, para graficar luego una curva carga-desplazamiento.

Se realizaron 10 ensayos por cada tipo de clavo, detallando los resultados en la sección 4.1.

### 3.2.2 Tensión de fluencia del acero $F_{yb}$

Siguiendo las determinaciones de la norma ASTM-F1575, para determinar la tensión de fluencia  $F_{yb}$  es necesario formar la curva característica de carga-desplazamiento obtenida en el ensayo. Luego de esto, se obtiene la recta que mejor se ajuste al rango elástico del gráfico, y finalmente dicha recta obtenida se desplaza en el eje horizontal un 5% del diámetro del clavo ensayado. El punto de intersección entre la recta desplazada y la curva carga-desplazamiento se denomina punto de fluencia, cuya componente en el eje vertical es la carga de fluencia  $P$ .

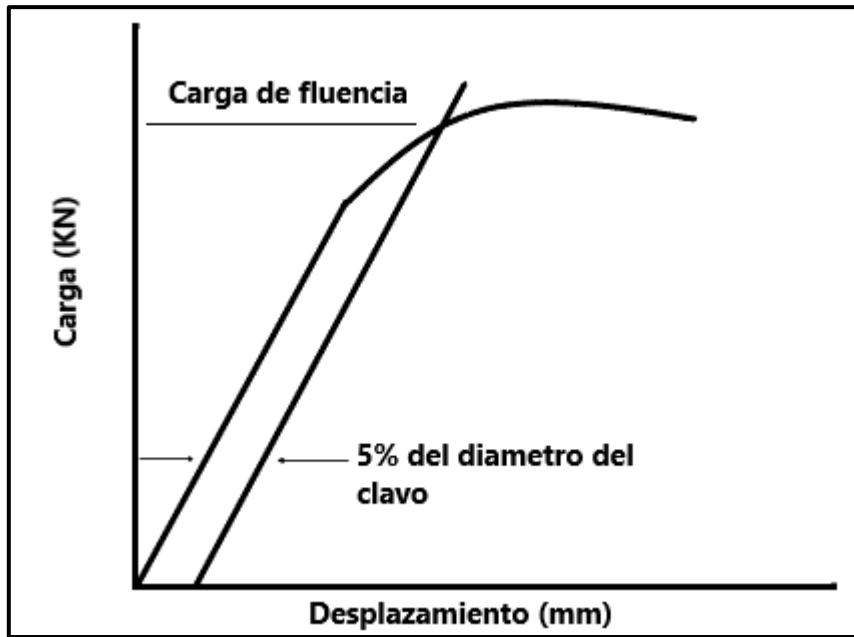


Figura 8 Curva carga-desplazamiento y carga de fluencia P (ASTM F-1575)

Habiendo obtenido la carga de fluencia P, la norma estipula que, para calcular el momento de fluencia, se debe aplicar la siguiente expresión:

$$M_y = \frac{P_0 * S_{bp}}{4}$$

Donde:

$M_y$ : Momento de fluencia (N\*mm)

P: Carga de fluencia, obtenida del grafico carga-deformación (N)

$S_{bp}$ : Separación entre apoyos (mm)

Finalmente, la tensión de fluencia  $F_{yb}$  queda determinada por la división entre el momento de fluencia y el módulo de sección plástica efectiva S:

$$F_{yb} = \frac{M_y}{S}, MPa$$

Donde:

$F_{yb}$ : Tensión de fluencia en el acero

S: Módulo de sección plástica efectiva

$$S = \frac{D^3}{6}, mm^3$$



### 3.2.3 Tensión de fluencia de clavos según la NCh 1198

Como se detalla en la sección 9.6.2.3 de la NCh 1198 Of2014, se pueden considerar, de manera conservadora, y basados en las tensiones de fluencia de las normas ASTM F1575 o ASTM F606, los valores siguientes:

$D \leq 6.4\text{mm}$      $F_{yb} = 896-56D$ , MPa

$D = 6.4\text{mm}$      $F_{yb} = 480$  MPa

$D = 8.0\text{mm}$      $F_{yb} = 410$  MPa

$D \geq 9.5\text{mm}$      $F_{yb} = 310$  MPa

Donde:

D: Diámetro del vástago, medido en mm

$F_{yb}$ : Tensión de fluencia para los medios de unión.

### 3.2.4 Otras propiedades obtenidas a partir del ensayo de tensión de fluencia a flexión de clavos

Además del propósito principal del ensayo en flexión de 3 puntos, se obtuvieron valores de resistencia, rigidez y ductilidad de los clavos ensayados.

## 3.3 Ensayo de Unión Pie Derecho-Tablero

Se siguió el procedimiento aplicando el ensayo simplificado controlado por deformación descrito en el protocolo CUREE. Para el cálculo del punto de fluencia de las uniones, se siguieron las indicaciones de la norma europea EN 12512.

### 3.3.1 Maquinaria e instrumentación

Para realizar el ensayo de carga cíclica a las probetas previamente construidas, se utilizó una bomba hidráulica de doble efecto marca MEGA modelo BMD-3, conectada a un cilindro de doble efecto marca MEGA modelo CDRA 9D, con una capacidad nominal de 9 Ton. Para medir la fuerza ejercida, se acopla al cilindro una celda de carga universal marca TML, modelo TCLK-50KNA, que trabaja bajo tracción y compresión, y tiene capacidad para registrar hasta 50KN. A su vez, para la medición del desplazamiento, se utilizaron 2 transductores LVDT de doble efecto marca TML modelo SDP-100CT, apoyados sobre bases magnéticas marca MITUTOYO modelo 7011SN

Para el sistema descrito, se confeccionaron adaptadores metálicos con la finalidad de anclar los dispositivos a una prensa hidráulica de capacidad 50 TON, y crear un sistema de sujeción que

pudiera considerarse monolítico para reducir el error de lecturas asociado a factores externos a la probeta. Puede observarse el sistema completo en la figura 10.



Figura 9 Instrumentación utilizada para el ensayo de unión

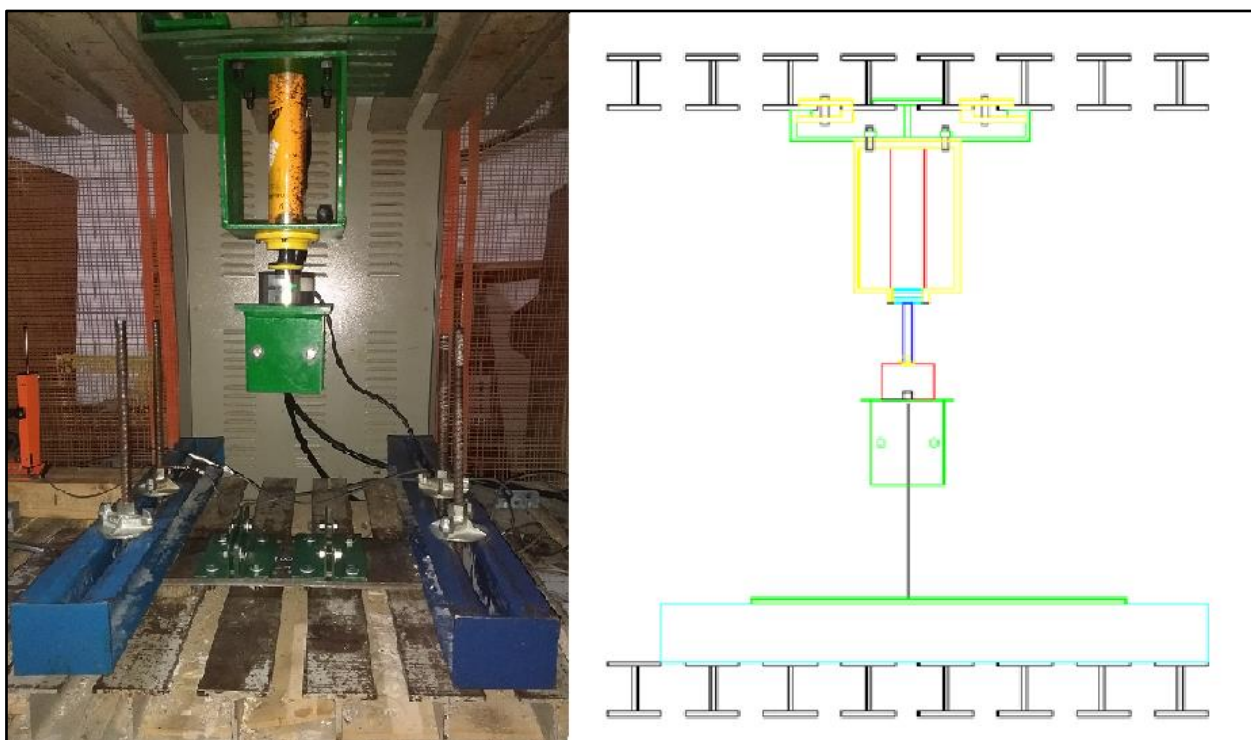


Figura 10 Disposición del sistema de ensayo de probetas

### 3.3.2 Protocolo CUREE

CUREE desarrolló un protocolo de ensayo cíclico para componentes de estructuras basadas en marcos de madera, basado en normas internacionales y con énfasis en el desarrollo de historiales de carga útiles para evaluar modos de falla, desarrollar ecuaciones y modelos analíticos, y la documentación de resultados.

Para efectos de esta investigación, y considerando las dificultades de la utilización de una bomba hidráulica manual, se utilizó el historial de carga básico simplificado, especificado en el apartado 1.1 del documento W-02 “development of a testing protocol for woodframe structures”, que supone una ejecución más fácil que el historial básico, ya que no obliga a que los ciclos finales tengan un 75% de la amplitud de los ciclos primarios, sino que utilizan la misma amplitud. Si bien esta simplificación facilita la ejecución del ensayo y su interpretación, también genera una sobreestimación del alcance del daño, sobre todo para los ciclos de mayor amplitud, por lo que sería menos cercano a la realidad y más conservador.

#### 3.3.2.1 Calibración mediante ensayo monotónico

Mediante la ejecución de un ensayo de carga monotónica, que entregará un valor de la capacidad de deformación monotónica,  $\Delta_m$ . Esta capacidad se define como la deformación en que la carga aplicada desciende, por primera vez, por debajo del 80% de la carga máxima que resistió la probeta. Dentro del protocolo se requiere utilizar para el ensayo básico de carga cíclica, un valor de  $\Delta=0.6\Delta_m$ . El factor de reducción considera la diferencia en la capacidad de deformación entre un ensayo monotónico y uno cíclico, en el que el daño acumulado generará un deterioro temprano de la unión.

#### 3.3.2.2 Protocolo de carga cíclica básico simplificado

El protocolo que se siguió fue el siguiente:

6 ciclos con una amplitud de  $0.05\Delta$

7 ciclos con una amplitud de  $0.075\Delta$

7 ciclos con una amplitud de  $0.1\Delta$

4 ciclos con una amplitud de  $0.2\Delta$

4 ciclos con una amplitud de  $0.3\Delta$

3 ciclos con una amplitud de  $0.4\Delta$

3 ciclos con una amplitud de  $0.7\Delta$

3 ciclos con una amplitud de  $1.0\Delta$

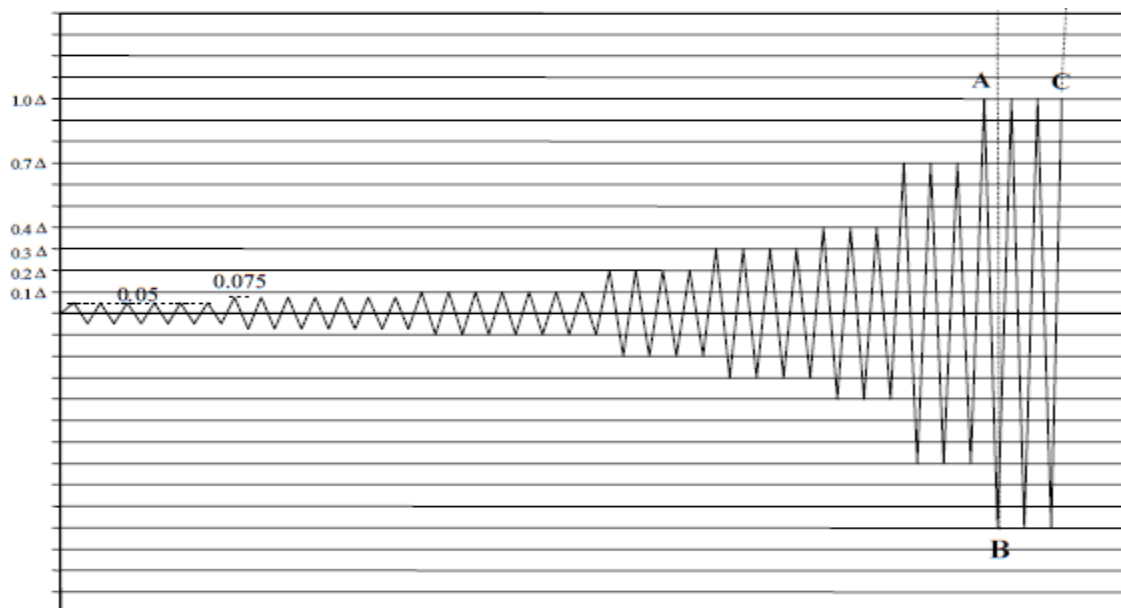


Figura 11 Protocolo de carga CUREE básico simplificado controlado por deformación

### 3.3.3 Probetas de ensayo

Se ensayaron probetas con dimensiones tales que fue posible obtener la información necesaria de resistencia y deformación de las uniones en servicio.

De esta manera, las dimensiones de las probetas a ensayar fueron las especificadas en la figura 12. Se confeccionó un total de 24 probetas, obteniendo resultados en 17 ensayos cíclicos y 5 monotónicos, además de 2 ensayos cuyos datos no pudieron ser extraídos de la tarjeta de memoria. Para las diferentes configuraciones de probetas se utilizó OSB de 11.1mm y OLB de 12mm de espesor, tableros de madera de pino radiata de 2x6 pulgadas, y 1 clavo por cada lado, totalizando 2 clavos por probeta realizada. Se utilizaron clavos anulares y helicoidales.

Tabla 6 Configuraciones de probetas

Pie Derecho	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso (kg)
	33	13.8	4.1	0.82
Tablero OSB	Largo (cm)	Alto (cm)	Espesor (mm)	
	24	20	11.1	
Tablero OLB	Largo (cm)	Alto (cm)	Espesor (mm)	
	24	20	12	

### 3.3.3.1 Propiedades físicas de las probetas

Todas las probetas tuvieron el mismo formato y dimensiones, con excepción de la diferencia de espesor entre el OSB (11.1mm) y OLB (12mm).

Densidad: 469.15 kg/m<sup>3</sup>      COV: 7.1%

Contenido de Humedad: 12.71% COV: 9.6%

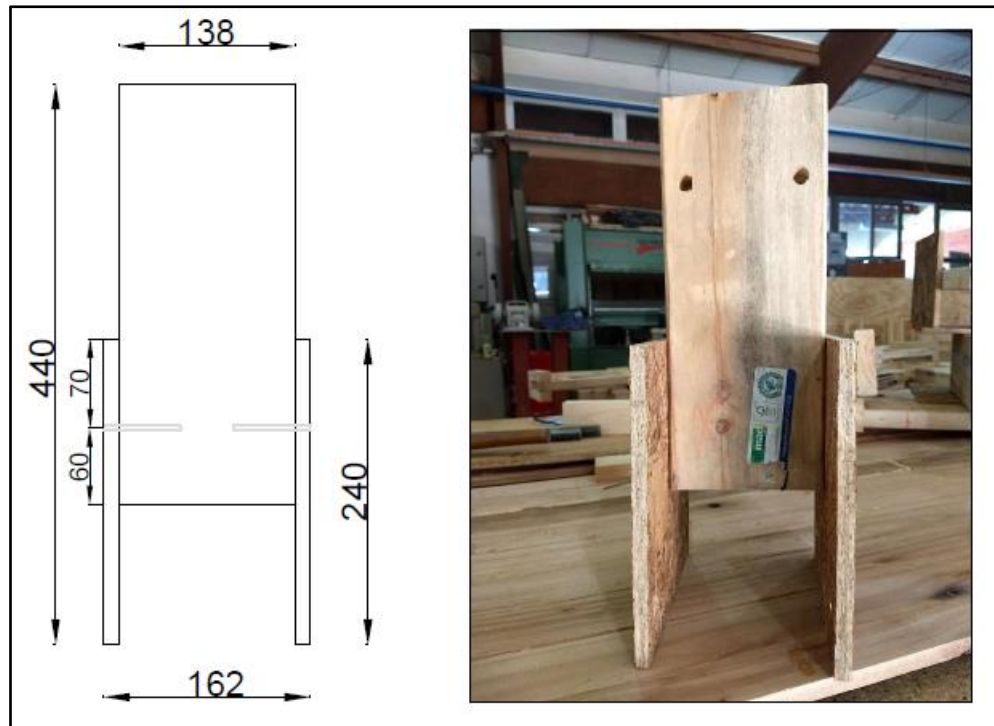


Figura 12 Dimensiones de las probetas

### 3.3.4 Propiedades mecánicas

Todos los cálculos fueron realizados sobre la envolvente del gráfico de histéresis.

- Resistencia

La resistencia corresponde a la carga máxima alcanzada durante el test. Generalmente se expresa en (N) o (kN).

- Punto fluencia

Representa el momento en que la probeta entra en el rango plástico. Para obtenerlo se utilizó como referencia la norma EN-12512, que indica, para el caso de no haber dos partes lineales bien definidas, aquella intersección entre la recta que cruza por el 10% y 40% de la carga máxima, y una recta cuya tangente sea 1/6 de la tangente del ángulo formado por la primera recta y el eje horizontal, tal como se aprecia en la figura 13.

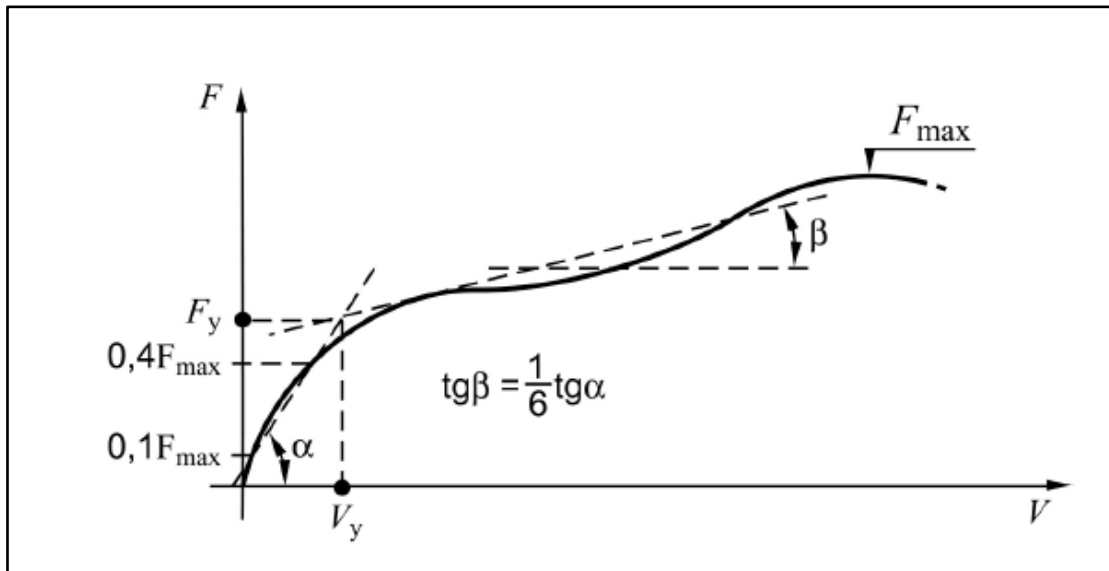


Figura 13 Punto de fluencia según EN 12512

- **Rigidez elástica**  
Se considera como rigidez la capacidad de la probeta para recibir cargas sin sufrir grandes deformaciones. Fue calculada dividiendo la carga de fluencia por el desplazamiento de fluencia. Se expresa en (N/mm).
- **Carga y desplazamiento último**  
Para definir el punto último, se consideró el descenso de un 20% de la carga máxima. Vale decir, el punto último es aquel que corresponde a un 80% de la carga máxima después de haber sido alcanzada esta última.
- **Ductilidad**  
Definida como la capacidad para experimentar deformaciones en el rango plástico antes de alcanzar el fallo. Se calcula como la razón entre el desplazamiento último y el desplazamiento de fluencia.

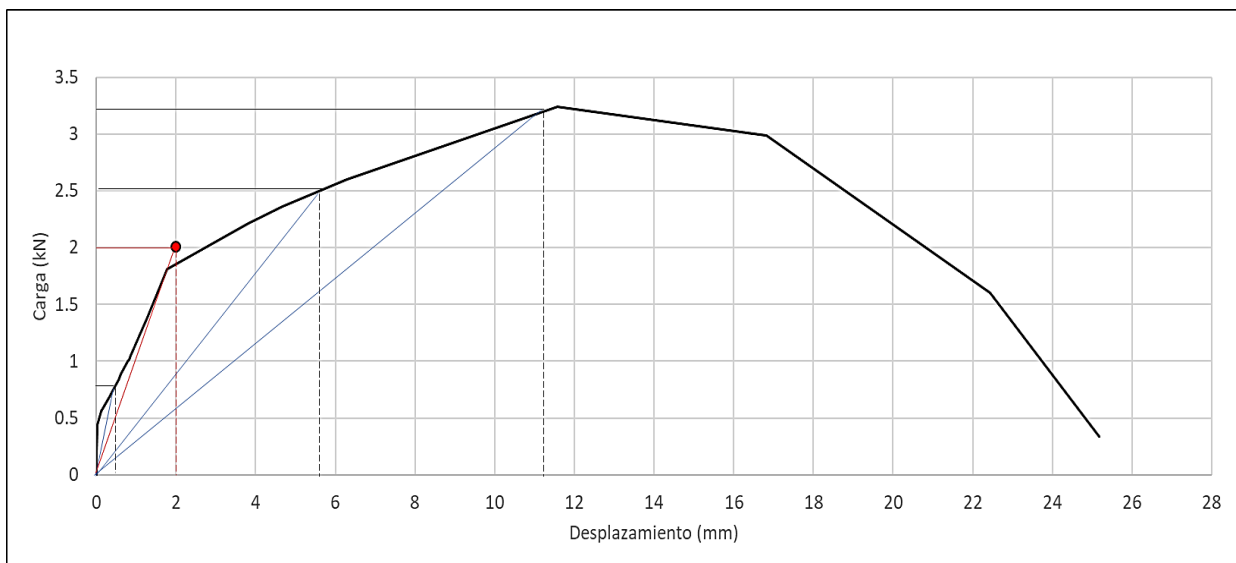
### 3.3.5 Degradación de la rigidez y deterioro de la resistencia

Acorde a la norma EN 12512, se calculó la degradación de la rigidez para conocer qué tanto se degrada la rigidez en los ensayos de carga cíclica. Además, para saber cuánta resistencia pierde la

probeta entre el primer ciclo y los dos posteriores, se calculó lo que la norma 12512 define como deterioro de la resistencia.

- Degradación de la rigidez:

Para esta propiedad, teniendo la rigidez elástica obtenida previamente, se procede a calcular la rigidez secante, que se define como la rigidez en cada uno de los puntos de la curva carga-desplazamiento. Además de esto, se calcula la ductilidad de cada punto, dividiendo el desplazamiento de dicho punto, por el desplazamiento de fluencia.



*Figura 14 Determinación de la rigidez secante*

- Deterioro de la resistencia:

Para medir qué tanta resistencia se pierde en los ensayos de carga cíclica, se comparó la carga máxima soportada por los primeros, segundos y terceros ciclos, calculada en la envolvente de dichos ciclos.

### 3.3.6 Propiedades teóricas y de diseño

Con la finalidad de comparar los resultados experimentales obtenidos del ensayo de carga cíclica, se buscaron valores referenciales en normas de diseño, detallando los resultados a continuación.

- $K_{ser}$ : definido como el módulo de deslizamiento (slip modulus) y medido en N/mm, puede ser comparado con la rigidez. Para clavos sin perforación guía, se determina de la siguiente manera:

$$K_{ser} = \frac{\rho m^{1.5} * d^{0.8}}{30}$$

Donde:

$\rho m$ : media geométrica de las densidades de los elementos, en  $\text{kg/m}^3$

$d$ : diámetro del clavo, en mm.

- $C$ : módulo de corrimiento de un medio de unión individual para cálculo de carga admisible de medios de unión, para uniones y empalmes. En  $\text{N/mm}$ , también comparable a la rigidez, para clavos en cizalle simple, sin perforación guía, se obtiene de la expresión dada en la tabla 48 de la NCh 1198:2014:

$$C = 5 * P_{ad}/d_c$$

Donde:

$D$ : Diámetro del vástago, en mm.

$P_{ad}$ : Carga de diseño, en N.

- $P_{el}$ : capacidad de carga admisible de cada clavo según la norma chilena NCh1198, en kN. Depende de los modos de fluencia, y corresponde al menor valor de carga admisible una vez evaluados todos los modos. Comparable con la resistencia de las probetas ensayadas.



#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados a partir del programa experimental. La sección 4.1 se refiere a los resultados obtenidos del ensayo de carga en flexión de clavos basados en los estándares de la norma ASTM F1575, utilizados para caracterizar la tensión de fluencia en uniones mecánicas tipo clavo. En la sección 4.2 se presentan los resultados obtenidos de ensayos utilizando cargas cíclicas mediante el protocolo CUREE para determinar las propiedades de ductilidad, rigidez y energía disipada en las uniones tablero-madera. Las probetas fueron ensayadas a ciclos de carga controlados por la deformación, como se mostró en la figura 11.



*Figura 15 Falla típica de los materiales utilizados*

En la figura 15 se pueden apreciar los materiales una vez concluidos los ensayos. La falla típica de los clavos corresponde al corte en la zona de contacto entre el tablero y pie derecho. También se nota el aplastamiento en la madera producido por los ciclos sucesivos de tracción y compresión. Para los tableros, la principal diferencia es que en el OSB se aprecia una “rajadura” del tablero, donde el clavo, en la mayoría de probetas, logró su rotura. Por otra parte, para los tableros de OLB,

si bien la mayoría de clavos tuvo el mismo comportamiento que con OSB, también existió la penetración del clavo en el tablero, perdiéndose la unión madera-tablero.

#### **4.1 Tensión de Fluencia en Flexión de Clavos**

Este ensayo fue realizado en 10 clavos helicoidales y 10 anulares, con el propósito de caracterizar la tensión de fluencia. El resultado fue un registro carga-desplazamiento, del cual, el punto de interés para caracterizar la tensión de fluencia en flexión es la carga y desplazamiento de fluencia. En los gráficos de las figuras 16 y 17 se aprecia el comportamiento de los clavos, teniendo las características típicas de un material dúctil, donde una vez sobrepasada la carga máxima en el rango elástico, logran seguir tomando carga y deformarse considerablemente antes de fallar. Este tipo de comportamiento es imprescindible para estructuras sismorresistentes, debido a que son las uniones los elementos que disipan la mayor cantidad de energía.

En la tabla 6 se puede observar que los promedios de tensión de fluencia en flexión experimental superan lo esperado según el cálculo basado en la NCh 1198.

El ensayo fue detenido una vez se visualizó que la curva carga-desplazamiento era suficiente para calcular la tensión de fluencia en flexión. Ningún clavo alcanzó la rotura.

En el anexo B se presentan las propiedades mecánicas de cada probeta ensayada.

Se puede apreciar que, para los dos primeros ensayos, entre el desplazamiento 0.5mm y 1.5mm, existe una diferencia muy grande respecto de todos los otros ensayos. Esto sucedió debido al sistema de sujeción de los apoyos, que se “soltó” de su lugar durante la carga, problema que fue corregido para los siguientes ensayos, por lo mismo no se consideraron los dos ejemplares de clavo helicoidal que generaron dichas curvas.

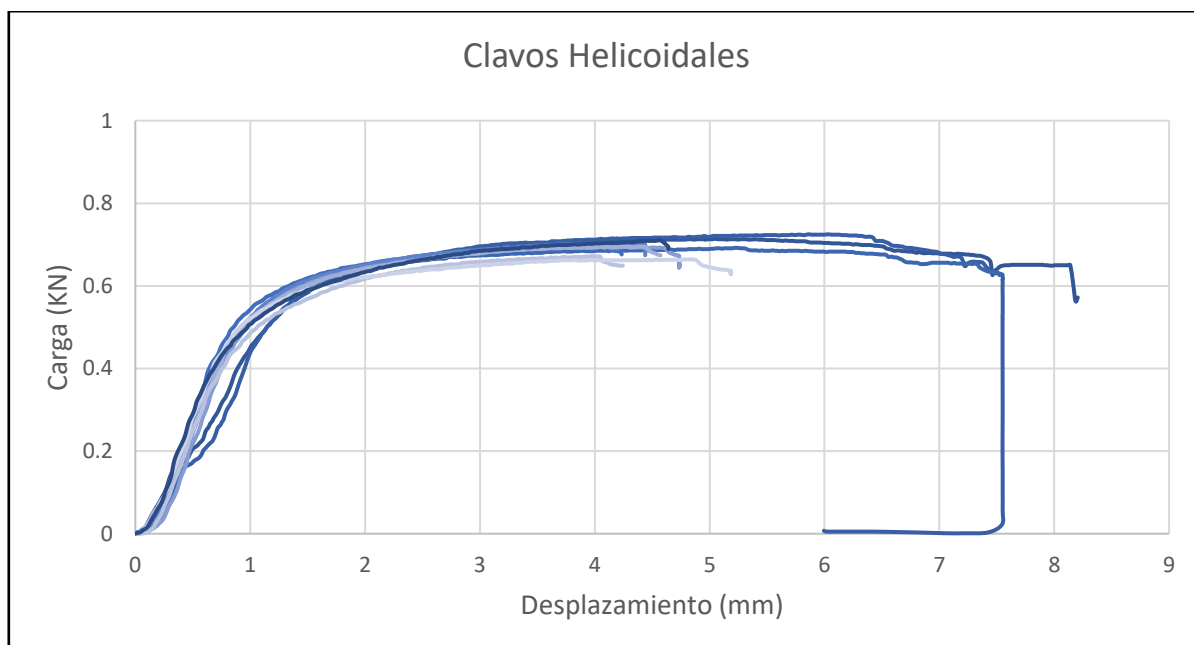


Figura 16 Curva carga-desplazamiento clavos helicoidales

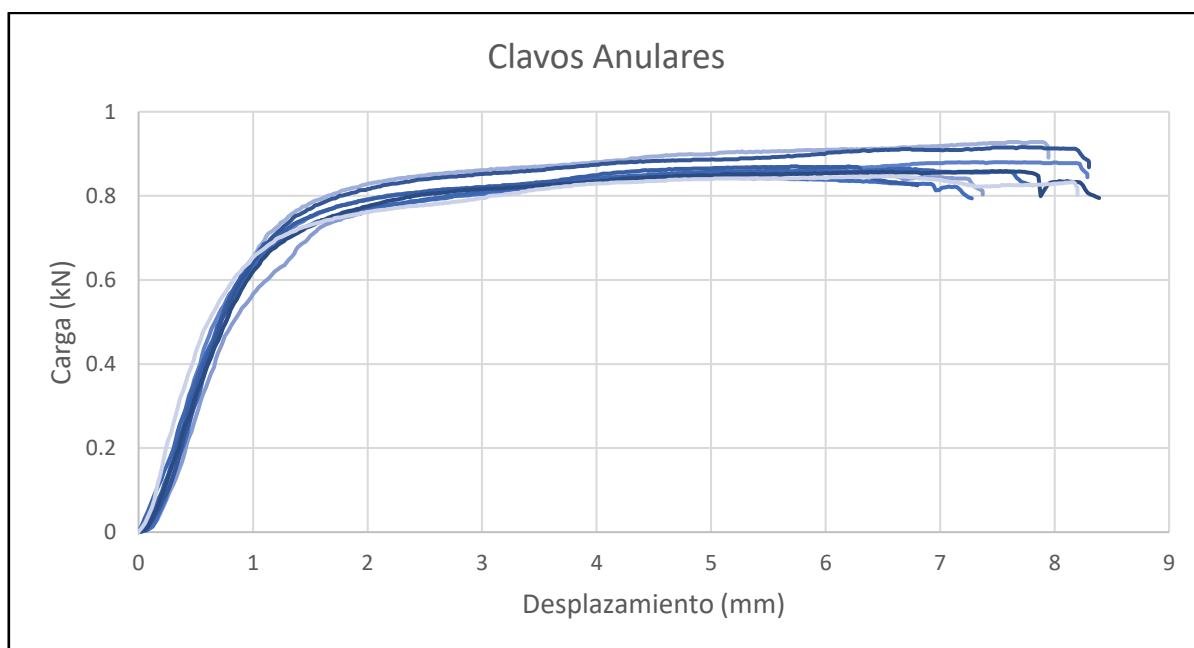


Figura 17 Curva carga-desplazamiento clavos anulares

Tabla 7 Tensión de fluencia en flexión experimental y teórica de los clavos ensayados

Tipo de clavo	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Experimental (MPa)	Teórico (MPa)	Diferencia (%)
Helicoidal	3.05	63.5	1011.63	719.1	40.68
Anular	4	60	725.36	664	9.24

La tabla 8 muestra los valores promedio de los ensayos de tensión de fluencia en flexión experimental, y se puede corroborar que, tal como explica la NCh 1198, los valores teóricos entregados son conservadores, y los valores experimentales resultan alrededor de un 40% mayores que la carga de fluencia teórica para los clavos helicoidales, y más de un 9% para el caso de los clavos anulares.

La totalidad de datos puede ser consultada en el anexo B.

*Tabla 8 Valores promedio de propiedades mecánicas de los clavos*

<b>Clavos</b>	<b>Resistencia (kN)</b>	<b>Rigidez (kN/mm)</b>	<b>Ductilidad</b>	<b>Fyb (MPa)</b>
<b>Anular</b>	0.871	0.601	6.423	725.363
<b>CV</b>	0.029	0.082	0.119	0.060
<b>Helicoidal</b>	0.708	0.481	3.959	1044.877
<b>CV</b>	0.047	0.117	0.187	0.107

Los valores de ductilidad mostrados en la tabla 9 no representan la realidad de los clavos, debido a que los ensayos fueron detenidos cuando se notaba que se había superado el límite de fluencia a través de la interfaz gráfica en tiempo real del datalogger. Por esto, solo se podrían comparar valores de rigidez, resistencia y tensión de fluencia en flexión.

## **4.2 Ensayo Mecánico de la Unión**

Este ensayo fue realizado en las configuraciones definidas en la tabla 5 con una probeta para el ensayo monotónico y cinco probetas para ensayo cíclico por cada configuración. Se utilizaron las maquinas e instrumentación definidas en el apartado 3.3.1. Como resultado se obtuvo el grafico del comportamiento histerético de cada probeta, del cual se pudieron calcular las propiedades mostradas a continuación. La totalidad de gráficos y propiedades pueden consultarse en los anexos C al F.

### *4.2.2 Propiedades mecánicas*

Se realizó la comparación tanto para los valores promedios de subciclos (tracción y compresión) como para el menor valor de cada subciclo.

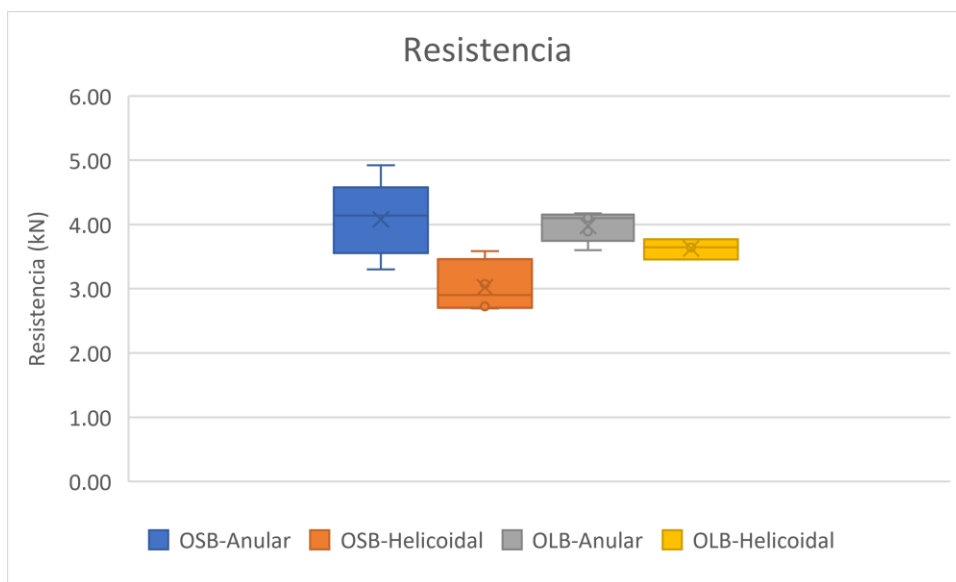


Figura 18 Comparación de Resistencia promedio

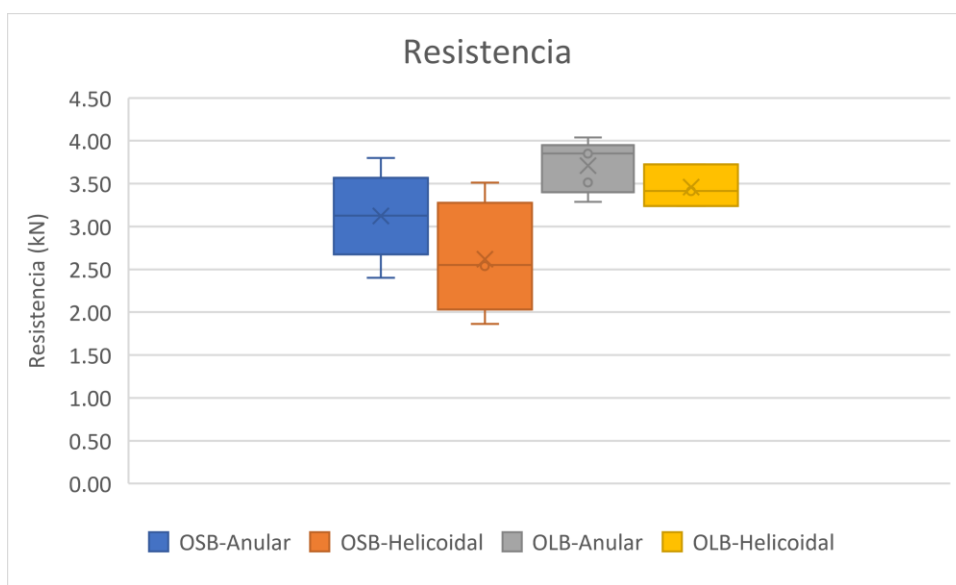


Figura 19 Comparación Resistencia subciclo de menor valor

Se puede notar en las figuras 18 y 19 que, para ambas configuraciones de tablero, los resultados alcanzados por los clavos anulares son entre un 10% y un 30% mayores que con clavos helicoidales. Además de esto, se nota, cuando se comparan los resultados de los menores subciclos, que el uso de tableros OLB genera un aumento de la resistencia en comparación con tableros OSB.

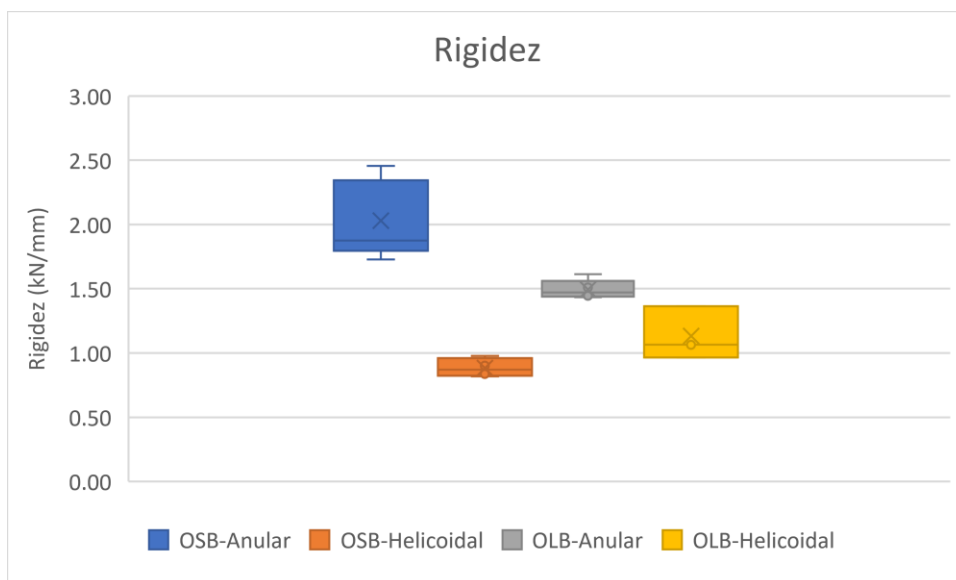


Figura 20 Comparación Rigidez promedio

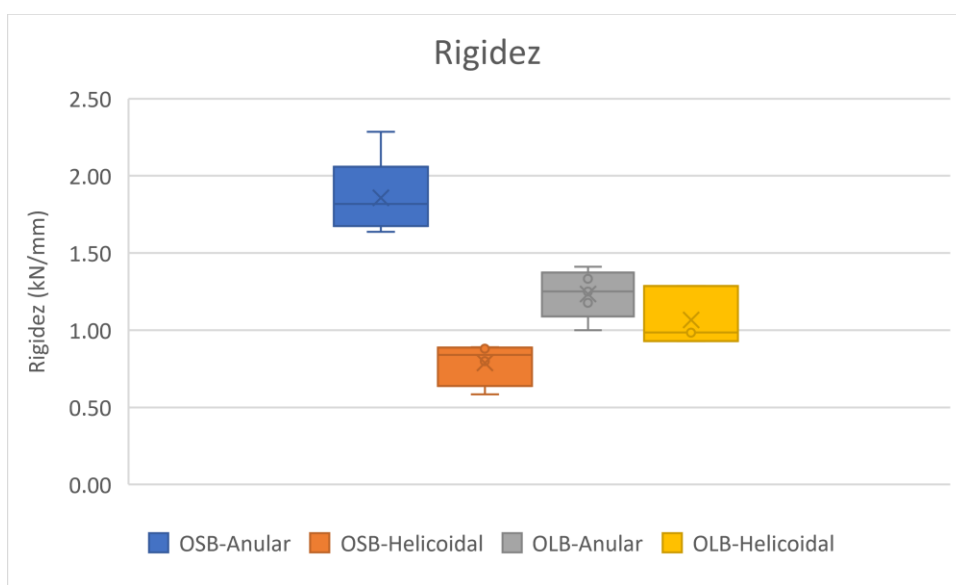


Figura 21 Comparación Rigidez subciclo de menor valor

Los resultados de las figuras 20 y 21 muestran que, independiente del tablero que se esté utilizando, la rigidez de los clavos anulares es superior a la de clavos helicoidales. Al comparar entre clavos de un mismo tipo, se puede ver que, para el caso de los anulares, tienen una mayor rigidez al trabajar en conjunto con el OSB. Por otro lado, los clavos helicoidales tuvieron una rigidez superior al unirse a tableros OLB.

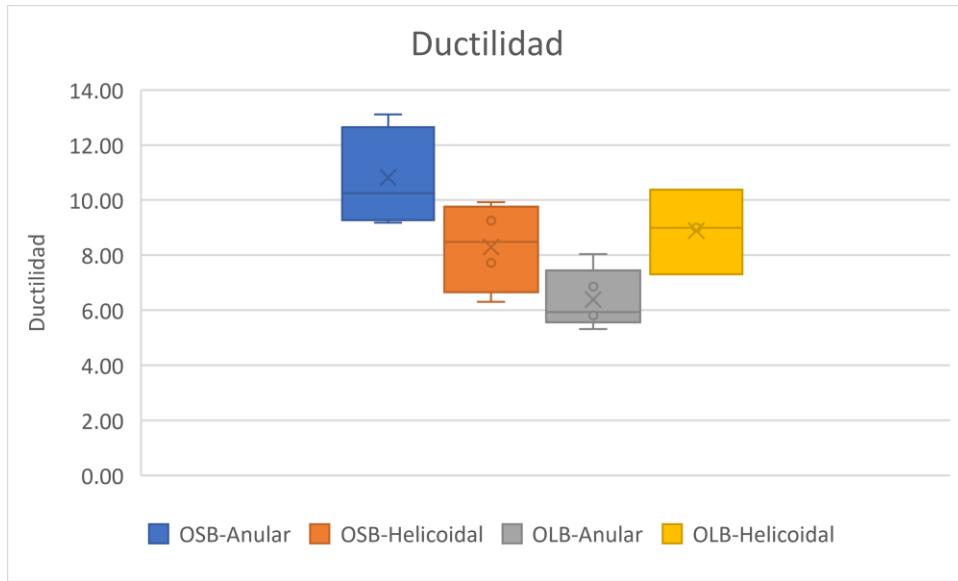


Figura 22 Comparación Ductilidad promedio

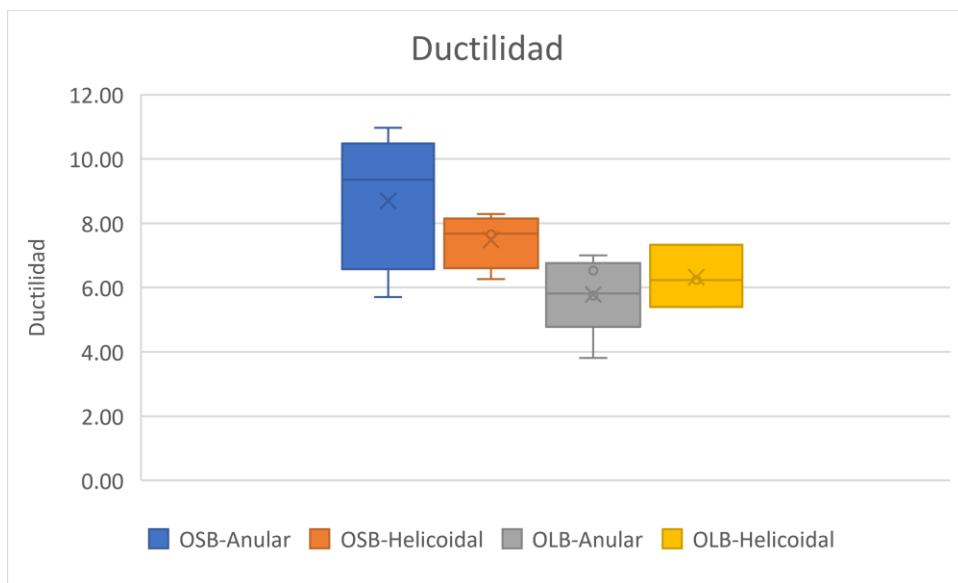


Figura 23 Comparación Ductilidad subciclo de menor valor

La ductilidad, mostrada en las figuras 22 y 23, para el caso de los valores promedio, fue mayor para el tablero OSB, utilizando el clavo anular, y, por el contrario, cuando se utilizó el OLB fue mayor con clavo helicoidal.

Cuando se comparan los valores menores entre subciclos de tracción y compresión, se puede notar una mayor ductilidad para ambos clavos cuando se utiliza OSB, representando casi un 35% más que cuando se utiliza la configuración con OLB.

4.2.3 Degradación de la rigidez y deterioro de la resistencia

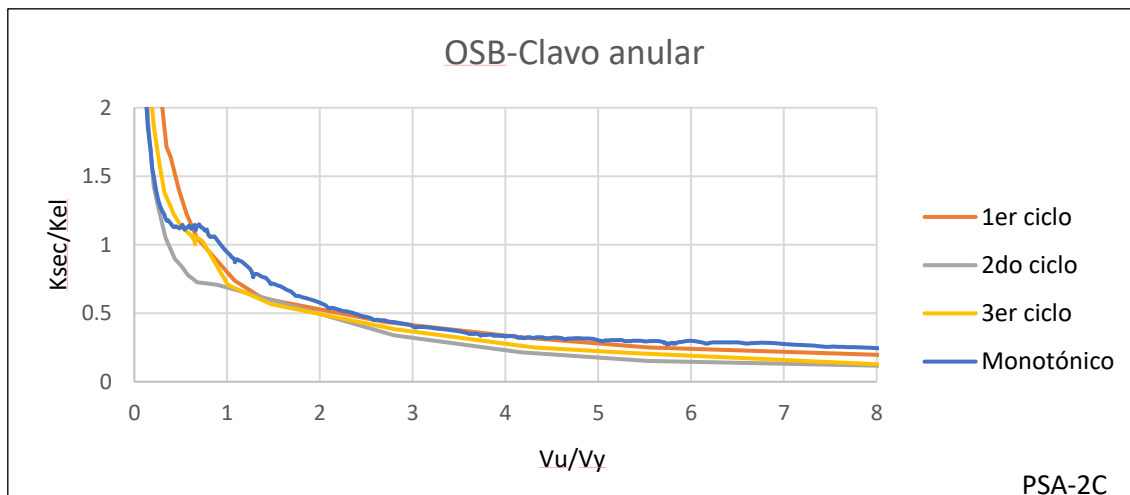


Figura 24 Degradación de la rigidez configuración OSB-Clavo anular

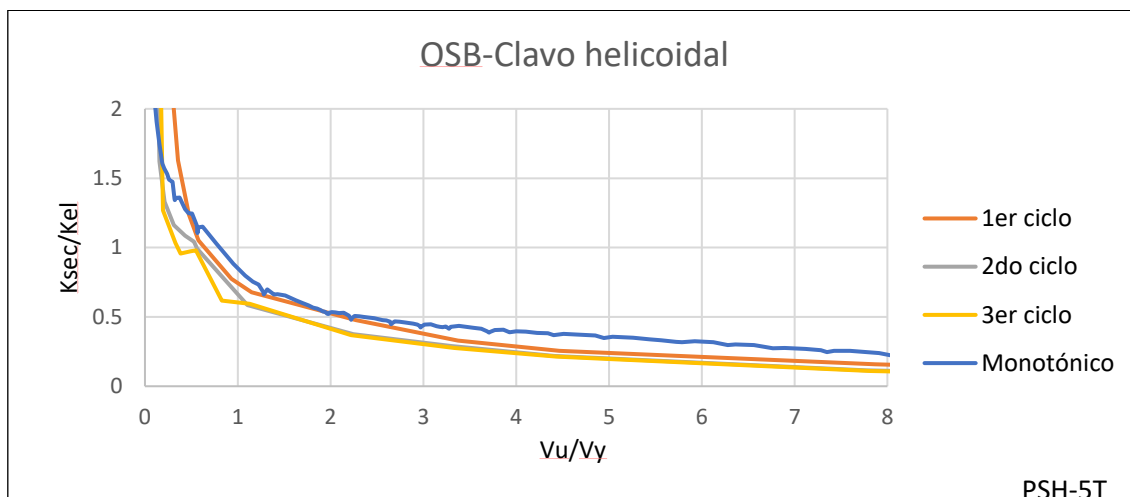


Figura 25 Deterioro de la resistencia configuración OSB-Clavo helicoidal

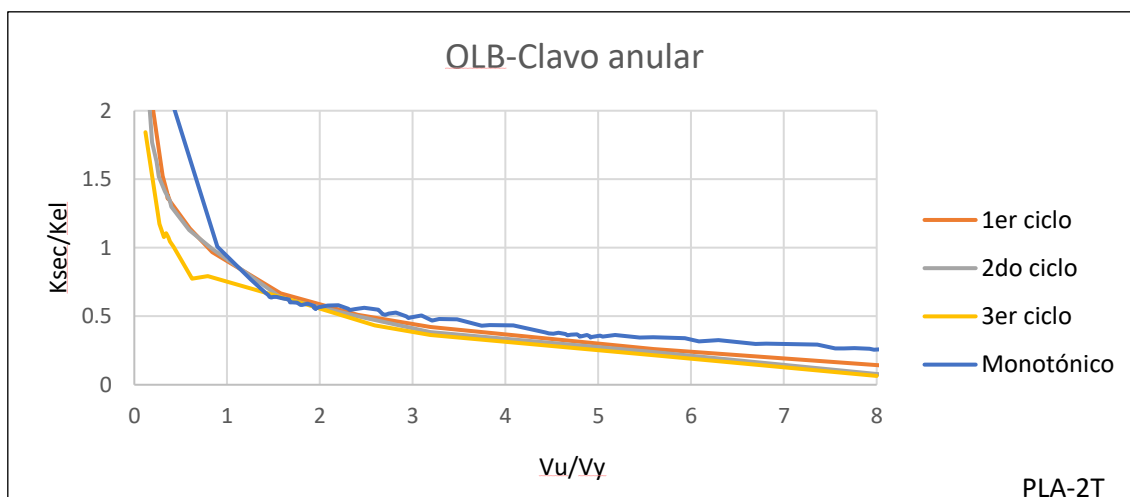


Figura 26 Deterioro de la resistencia configuración OLB-Clavo anular



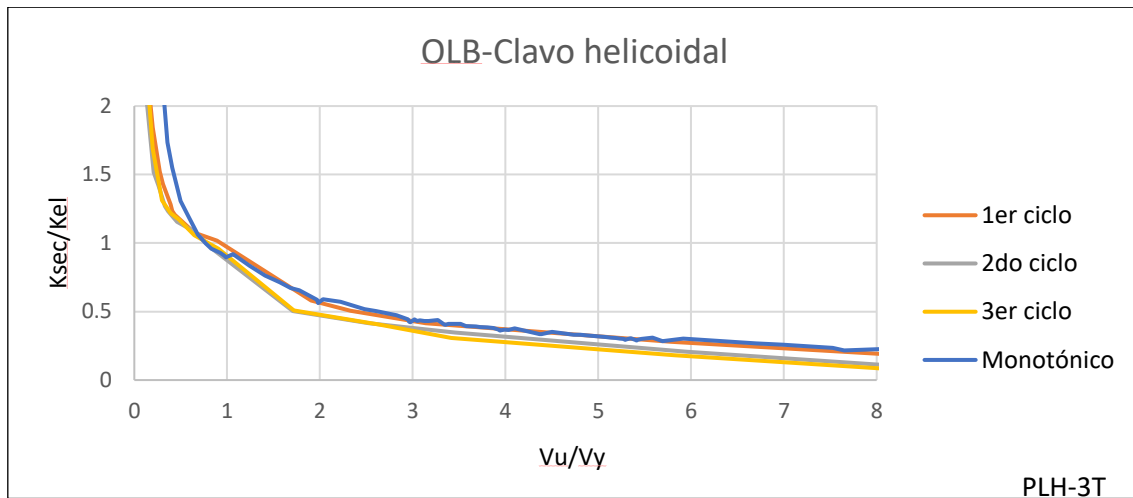


Figura 27 Deterioro de la resistencia configuración OLB-Clavo helicoidal

Para estos gráficos (figura 24 a 27), se representan en el eje vertical la rigidez secante dividida por la rigidez elástica, mientras que, para el eje horizontal, el desplazamiento de cada punto de la curva carga-desplazamiento sobre el desplazamiento de fluencia.

Se nota que para ductilidad 1, la rigidez secante es muy similar a la rigidez elástica. Esto es debido a que todavía la probeta se encuentra en el rango elástico. Una vez superado este rango (ductilidades mayores a 1) se ve un deterioro similar para todas las configuraciones y para los 1eros, 2dos y terceros ciclos de cada configuración. Del ensayo monotónico, se visualiza una degradación mínimamente mayor, debido a que no existe la misma proporción de aplastamiento de la madera ni fatiga de los clavos.

Este gráfico sirve para hacer una idea del comportamiento de estructuras, donde una degradación del 20% de la rigidez se considera aún como un nivel de serviciabilidad y daño reparable, mientras que para un 60% de la rigidez elástica ya se acerca al concepto de colapso.

Podríamos decir entonces, que para ductilidades entre 1 y 1.5, el daño al que fue sometida la unión en todas las configuraciones, sigue siendo reparable. Mientras que para niveles de ductilidad entre 2.5 y 3.5, se estaría hablando del colapso.

Deterioro de la resistencia:

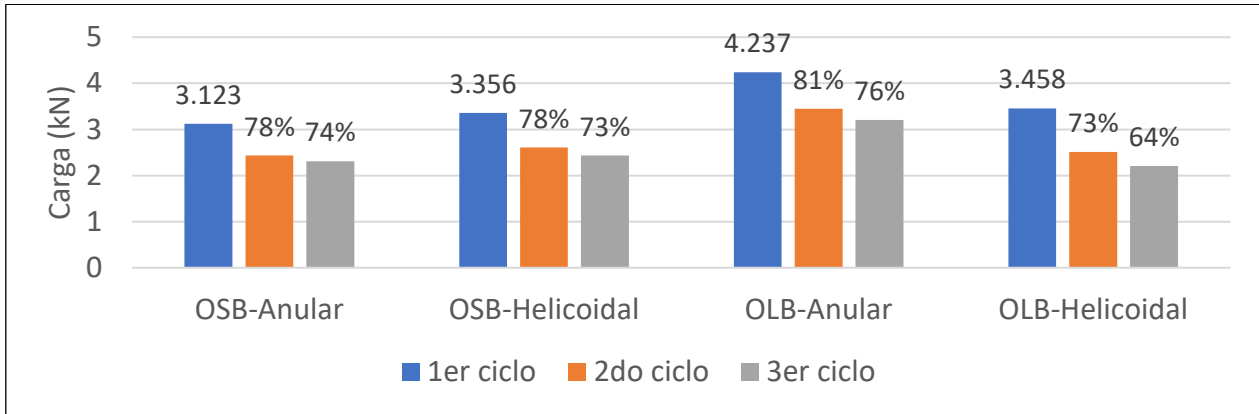


Figura 28 Deterioro de la resistencia de la envolvente de 1eros, 2dos y 3eros ciclos para todas las configuraciones

Del gráfico en la figura 28 se desprende que el comportamiento del deterioro de la resistencia es similar para todas las configuraciones de probetas, en donde se ve la carga para los primeros ciclos, que corresponde al 100%, y los porcentajes de carga resistidos por los 2dos y 3eros ciclos. Con esto, se percibe un deterioro cercano al 20% de la resistencia entre el primero y el segundo ciclo, y alrededor de un 25% entre primer y tercer ciclo.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En esta investigación se caracterizó el comportamiento mecánico de uniones clavadas, que corresponde al método de fijación de muros, tabiques y diafragmas típica del sistema constructivo marco plataforma. Se utilizaron pies derechos de Pino Radiata, paneles estructurales OSB y no estructurales OLB, y clavos tanto anulares como helicoidales.

Para lograr el objetivo se sintetizó el estado del arte de estudios de estructuras de madera que han sido sometidas a cargas monotónicas y cíclicas, concluyendo que, si bien existen estudios previos en la comunidad internacional, es necesario continuar realizando investigaciones que consideren las condiciones específicas de materiales y sismológicas del país. De igual manera, a nivel nacional aún hace falta una norma que rijan los estudios de carga cíclica para elementos estructurales de madera.

### **5.1 Conclusiones Sobre los Ensayos de Flexión en Elementos de Unión**

La caracterización de la tensión de fluencia de clavos anulares y helicoidales mediante ensayos experimentales fue realizada con éxito. La instrumentación y equipamiento implementados permitieron desarrollar los ensayos conforme a los protocolos indicados en la norma ASTM F-1575. Con esto, se logró que ambos modelos de clavos desarrollaran su curva de carga-deformación lo suficiente como para obtener sus propiedades mecánicas en la zona elástica y parte de la zona plástica.

Los clavos anulares desarrollaron una tensión de fluencia alrededor de un 10% mayor a los valores obtenidos teóricamente a través de la normativa NCh 1198, y los clavos helicoidales mostraron que sus valores son un 40% mayor a los obtenidos mediante la misma norma.

Estos valores, si bien según la norma son conservadores, parecen hacerse menos conservadores a medida que aumenta el diámetro del clavo. Para confirmar esto deberían realizarse ensayos de flexión con clavos de un mismo material y diseño, pero de distintos diámetros.

### **5.2 Conclusiones Sobre la Evaluación del Comportamiento de Uniones ante Cargas Cíclicas**

Los ensayos experimentales realizados para la caracterización del comportamiento mecánico, utilizando clavos anulares y helicoidales como medio de unión, se desarrollaron con éxito. Gracias a la instrumentación y equipamiento implementados en el laboratorio, además de los anclajes diseñados para conectar las probetas a la máquina de ensayos, se pudieron realizar los ensayos

siguiendo los pasos definidos en el protocolo CUREE. De esta manera se obtuvieron las curvas de histéresis y las principales propiedades mecánicas.

Los ensayos muestran que el comportamiento de las uniones realizadas con clavos anulares es más rígido y resistente que aquellas realizadas con clavos helicoidales. Sobre la ductilidad los resultados son dispares, debido principalmente a los desplazamientos últimos que se generan.

Si se comparan los tableros, los resultados sugieren que el reemplazo de tableros de fibras orientadas por tableros de partículas de una capa (OLB) genera un aumento tanto en la rigidez como en la resistencia de los clavos de menor diámetro (helicoidales), esto puede deberse a que para menores diámetros el clavo helicoidal tiende a penetrar en el OSB perdiendo la capacidad de la unión, mientras que con clavos anulares no genera un aumento o este no es significativo.

También, en concordancia con conclusiones presentadas en el estado del arte, se puede concluir que la ejecución de ensayos de carga cíclica entrega más propiedades, y propiedades más acordes a la realidad de lo que ocurre durante un sismo, en donde existe el efecto de aplastamiento de la madera y la fatiga de los elementos de unión.

Finalmente, el uso de una bomba hidráulica manual, si bien dificulta la realización de los ensayos en el sentido de la precisión de las amplitudes, sobre todo la amplitud de los primeros grupos de ciclos, no afecta directamente en los resultados.

### **5.3 Recomendaciones**

Para un estudio más detallado, se recomienda utilizar una máquina de carga programable, para realizar ensayos cíclicos más acercados a la realidad sísmica del país, y con un mayor nivel de confiabilidad.

Con el propósito de hacer una comparación equitativa, y poder definir realmente cuál alternativa de clavado es mejor para la construcción de muros y diafragmas en el sistema marco plataforma, se recomienda hacer ensayos con clavos de iguales dimensiones. Además, como las propiedades mecánicas cambian según el tipo de acero utilizado, se recomienda realizar una comparación para el mismo tipo de clavo utilizando distinta materialidad.

Para medir la eficiencia de construir uniones usando una alternativa sobre otra, se recomienda hacer un análisis económico similar al realizado por (Fuentealba, 2014) en el que se compare el aumento de capacidad de carga de las uniones con el costo asociado, para determinar qué solución entrega una mejor razón precio/calidad.

De igual manera, se hace necesario realizar todos estos análisis en escala real, tanto de muros como de estructuras completas. Con esta información se podrán sentar bases para establecer modelos numéricos que entreguen valores más exactos que los actuales, y se podrá definir el mejor elemento de unión para cada pieza de la estructura, utilizando las más resistentes solo en ubicaciones con mayor demanda de carga, generando un ahorro en la edificación sin perder resistencia final.

Por último, se recomienda seguir realizando investigaciones que potencien el uso de la madera en la construcción de baja y mediana altura, y colaboren al cambio de la normativa chilena de diseño sísmico de edificios NCh 433.

## 6. REFERENCIAS

- Arriaga, F., Íñiguez, G., Herrero, M., Argüelles, R., & Fernández, J. (2015). *Diseño y cálculo de uniones en estructuras de madera*. Madrid: MADERIA.
- ASTM. (2017). ASTM F1575 - 17. *Standard Test Method for Determining Bending Yield Moment of Nails*. EEUU.
- BRITISH STANDARD. (2001). BS EN 12512:2001. *Timber structures - Test methods - Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners*. United Kingdom.
- Catalán, J. (2016). *Comportamiento estructural y diseño analítico de muros de madera frente a cargas laterales*. Concepción: Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- CORMA. (2003). *Centro de transferencia tecnológica Pino Radiata*.
- Countryman, D., & Colbenson, P. (1954). *Horizontal plywood diaphragm test*. Washington: Douglas Fir Plywood Association.
- Dean, J., Stewart, W. G., & Carr, A. J. (1986). The seismic behaviour of plywood sheathed shearwalls. *BULLETIN OF THE NEW ZEALAND NATIONAL SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING*, 19(1), 48-63.
- Dolan, J. D. (1989). *The dynamic response of timber shear walls*. Vancouver.
- Fritz, A. (2004). *La construcción de viviendas en madera*.
- Fuentealba, B. (2014). *Modelación numérica de muros de corte de madera bajo cargas laterales monotónica*. Concepción: Universidad del Bío Bío.
- Germano, F., Metelli, G., & Giuriani, E. (2015). Experimental results on the role of sheathing-to-frame and base connections of a European timber framed shear wall. *Construction and Building Materials*, 80, 315-328.
- González, M. (2013). Construcción en Madera: La opción eficiente. *LIGNUM*, 143, 4.
- INN. (2009). Diseño sísmico de edificios. *NCh 433.Of.1996 modificada en 2009*. Chile.
- INN. (2014). NCh 1198:2014. *Madera - Construcciones en madera - Cálculo*. Chile.
- Instituto Forestal. (2016). *Caracterización mecánica y diseño analítico de muros estructurales de madera sometidos a cargas laterales*. Concepción: INFOR.
- Instituto Forestal. (2018). *Anuario Forestal*. Santiago.
- Johnson, R. (2015). *Investigation of Shear Capacity for Light-Frame Wood Walls Constructed with Insulated Oriented Strand Board Panels*. Clemson University.
- Keith, E., & Rose, J. (1994). Hurricane Andrew—Structural Performance of Buildings in South Florida. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 8, 178-191.
- Loferski, J. (2015). Light-frame Building Construction with 2 by 4 Lumber – The “New” Old Building System of American Housing. *Internationales Holzbau-Forum IHF*. Garmisch-Partenkirchen.

- Lomagno, J., & Gotelli, G. (2003). RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO DE UNIONES CLAVADAS DE TABLEROS DE HOJUELAS ORIENTADAS (OSB). *Maderas ciencia y tecnología*, 5(1), 45-50.
- Rammer, D., Winistorfer, S., & Bender, D. (2001). Withdrawal Strength Of Threaded Nails. *Journal of Structural Engineering*, 141(5), 442-449.
- Santa María, H., Hube, M., Rivera, F., Yepes-Estrada, C., & Valcárcel, J. (2017). Development of national and local exposure models of residential structures in Chile. *Natural Hazards*, 86, 55-79.
- Sartori, T., & Tomasi, R. (2013). Experimental investigation on sheathing-to-framing connections in wood shear walls. *Engineering structures*, 56, 2197–2205.
- Shadravan, s., & Ramseyer, C. (2018). Investigation of Wood Shear Walls Subjected to Lateral Load. *Structures*, 16, 82-96.
- Verdret, Y., Faye, C., Elachachi, S. M., Magorou, L. L., & García, P. (2015). Experimental investigation on stapled and nailed connections in light timber frame walls. *Construction and Building Materials*, 91, 260-273.

## 7. ANEXOS

### Anexo A

#### Cálculo de participación del sector forestal en las exportaciones de Chile

La imagen siguiente ilustra el total de millones de dólares exportados en cada año, y en la columna final representa el porcentaje aportado por el sector forestal.

Como se indica en la justificación, el aporte del sector forestal fue calculado de la siguiente manera:

- Para cada año mostrado en la imagen, se obtuvo la cantidad aportada por el sector forestal, multiplicando el total (columna 2) por la participación del sector (columna 6)
- Se realizó la sumatoria de totales (columna 2), resultando en 872.331 millones de dolares, y de participacion del sector (col. 2 x col. 6), obteniendo 66.737 millones de dolares.
- La división entre 66.737 y 872.331 da como resultado 0.0765, lo que significa que el sector forestal aportó en promedio un 7.65% a las exportaciones totales del país

Año/ Year	Total/ Total	Minería/ Mining	Agropecuario, Silvícola y Pesquero/ Agriculture, Forestry and Fishing	Industria/ Industry	Participación del sector forestal/ Share or forestry sector (1)
2005	41.974	21.972	2.562	17.440	8,3%
2006	59.380	36.438	2.809	20.133	6,5%
2007	68.561	42.445	3.287	22.829	7,2%
2008	64.510	34.294	4.066	26.150	8,5%
2009	55.463	31.877	3.668	19.918	7,5%
2010	71.109	44.552	4.372	22.185	7,0%
2011	81.438	49.083	4.969	27.385	7,3%
2012	78.063	46.260	5.019	26.784	6,9%
2013	76.770	43.700	5.647	27.422	7,4%
2014	75.065	40.437	5.621	29.007	8,1%
2015	62.035	32.340	5.194	24.502	8,7%
2016	60.733	30.844	5.895	23.995	8,7%
2017	69.230	37.957	5.610	25.663	7,8%

Fuente/Source: Banco Central de Chile/Central Bank of Chile. Fuente/Source: INFOR



**Anexo B****Ensayo de flexión en 3 puntos para los elementos de unión**

Cálculo de tensión de fluencia en flexión según ASTM F1575-17

Clavos Anulares			
Muestra	P <sub>0</sub> (N)	$M_y = P_0 * S_{bp} / 4$ (N*mm)	$F_{yb} = M_y / S$ (MPa)
1	715	8222.5	770.84
2	729	8383.5	785.93
3	614	7061	661.95
4	625	7187.5	673.81
5	683	7854.5	736.34
6	678	7797	730.95
7	689	7923.5	742.80
8	702	8073	756.82
9	673	7739.5	725.56
10	620	7130	668.42

Clavos Helicoidales			
Muestra	P <sub>0</sub> (N)	$M_y = P_0 * S_{bp} / 4$ (N*mm)	$F_{yb} = M_y / S$ (MPa)
1	596	5304.4	1121.73
2	606	5393.4	1140.55
3	559	4975.1	1052.09
4	522	4645.8	982.45
5	547	4868.3	1029.51
6	546	4859.4	1027.62
7	533	4743.7	1003.16
8	458	4076.2	862.00
9	523	4654.7	984.34
10	485	4316.5	912.82

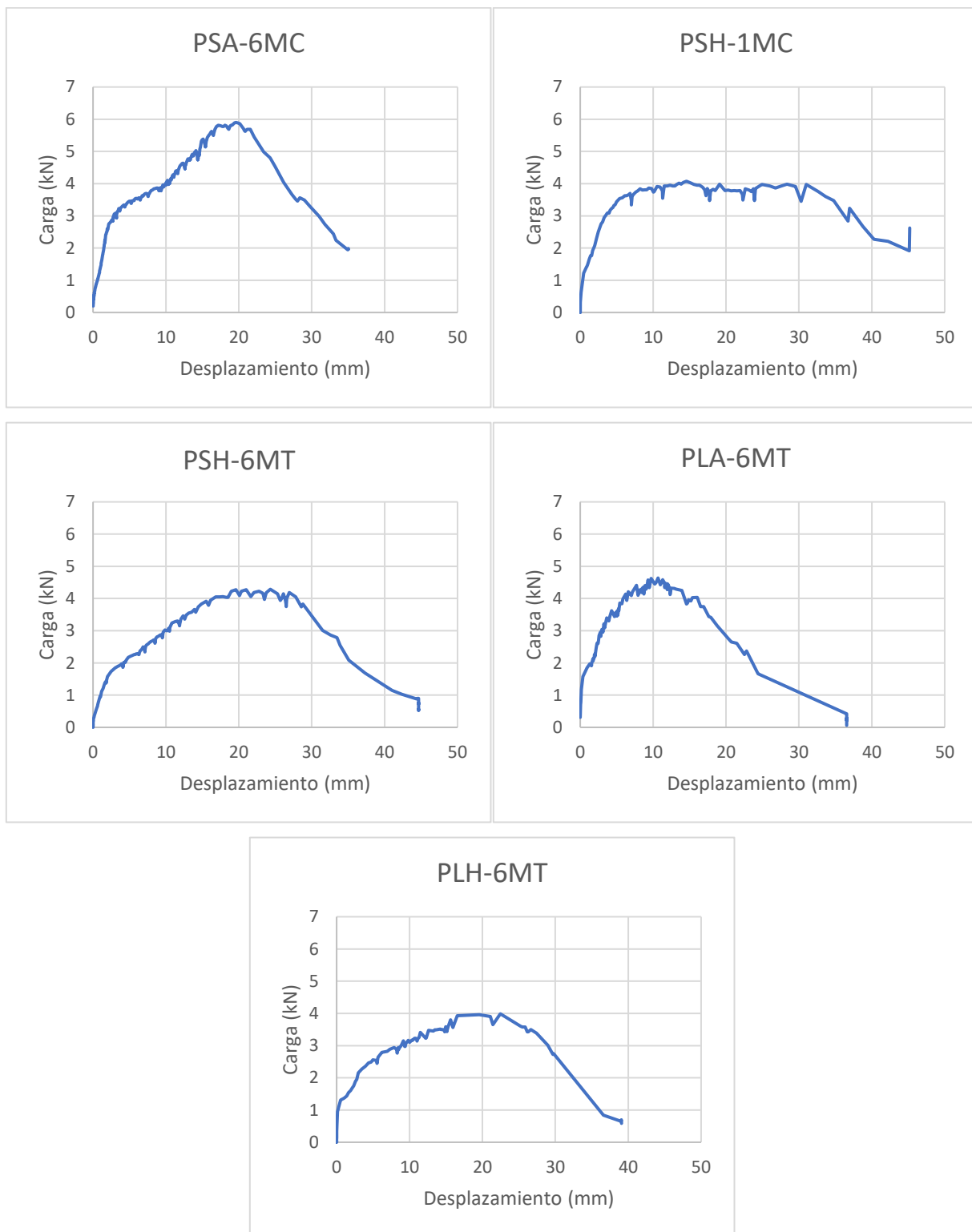
Valores de resistencia, rigidez, ductilidad y tensión de fluencia en flexión de cada ensayo:

Clavos Helicoidales				
Muestra	Resistencia (kN)	Rigidez (kN/mm)	ductilidad	Fyb (mPa)
1	0.71	0.38	5.00	1121.73
2	0.73	0.37	4.95	1140.55
3	0.69	0.48	5.32	1052.09
4	0.70	0.57	3.25	982.45
5	0.70	0.50	3.45	1029.51
6	0.70	0.48	3.63	1027.62
7	0.70	0.50	3.37	1003.16
8	0.67	0.50	3.15	862.00
9	0.66	0.52	3.97	984.34
10	0.71	0.53	3.65	912.82
<b>Promedio</b>	0.71	0.48	3.96	1044.88
<b>Desviación</b>	0.03	0.06	0.74	111.71
<b>CV</b>	0.05	0.12	0.19	0.11

Clavos Anulares				
Muestra	Resistencia (kN)	Rigidez (kN/mm)	ductilidad	Fyb (mPa)
1	0.87	0.57	5.19	770.86
2	0.92	0.60	6.80	785.95
3	0.86	0.52	6.07	661.97
4	0.87	0.66	7.22	673.83
5	0.84	0.58	6.17	736.36
6	0.86	0.59	6.41	730.97
7	0.87	0.61	5.22	742.83
8	0.92	0.60	7.16	756.84
9	0.86	0.57	6.78	725.58
10	0.85	0.70	7.21	668.44
<b>Promedio</b>	0.87	0.60	6.42	725.36
<b>Desviación</b>	0.03	0.05	0.72	41.36
<b>CV</b>	0.03	0.08	0.12	0.06

## Anexo C

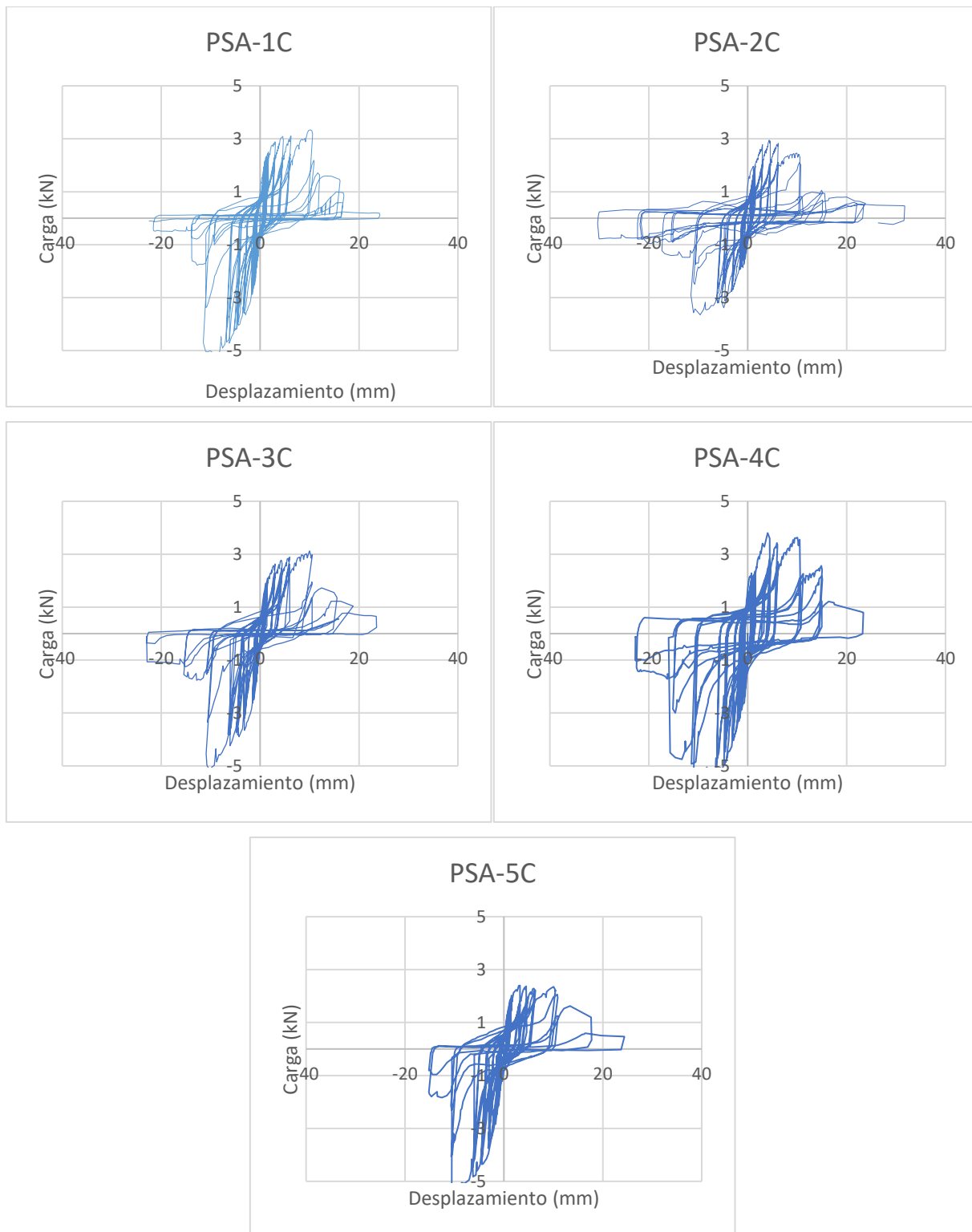
### Respuesta monótonica de la unión



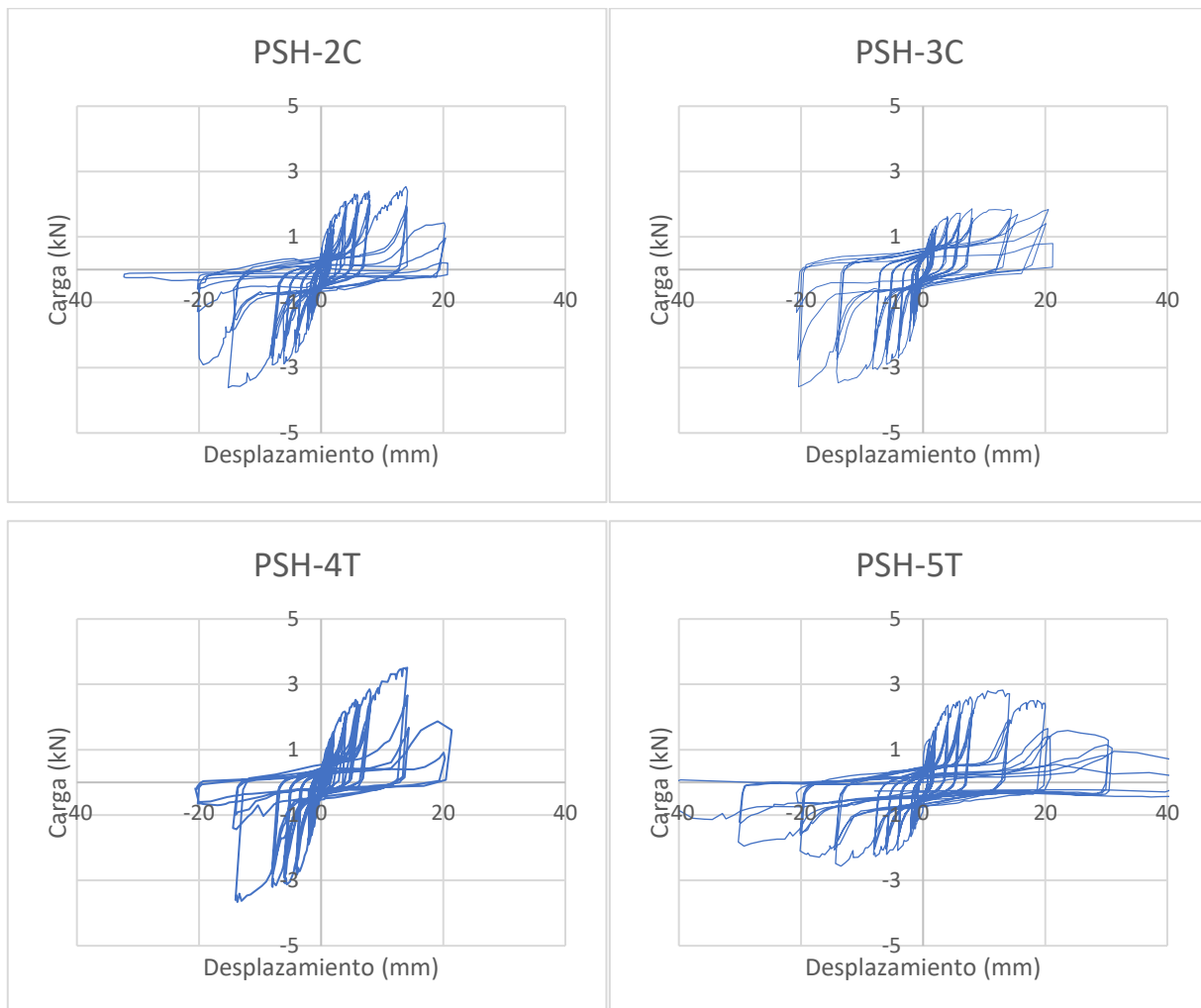
## Anexo D

### Respuesta del ensayo de carga cíclica para la unión clavada

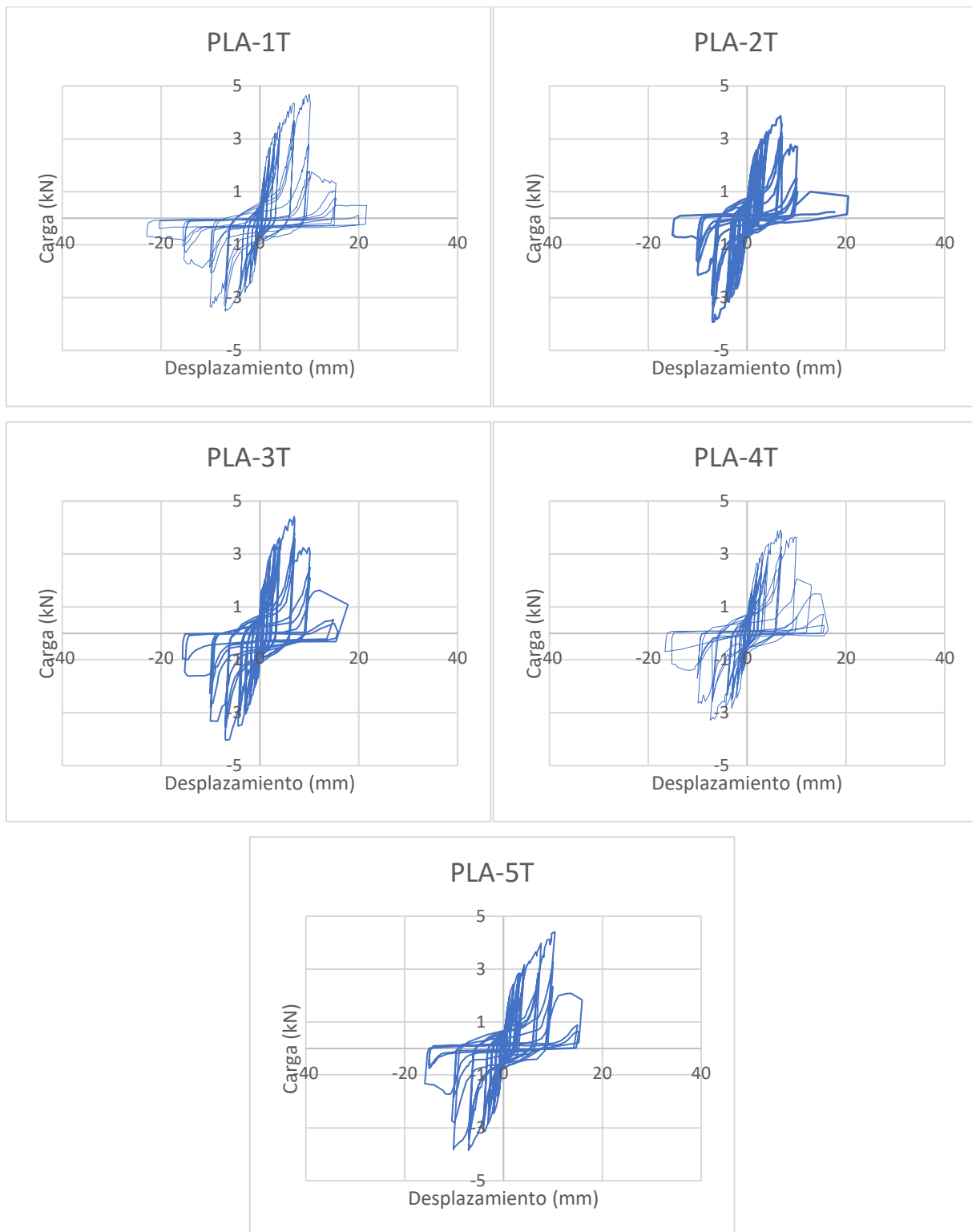
Respuesta cíclica probetas OSB-Clavo anular



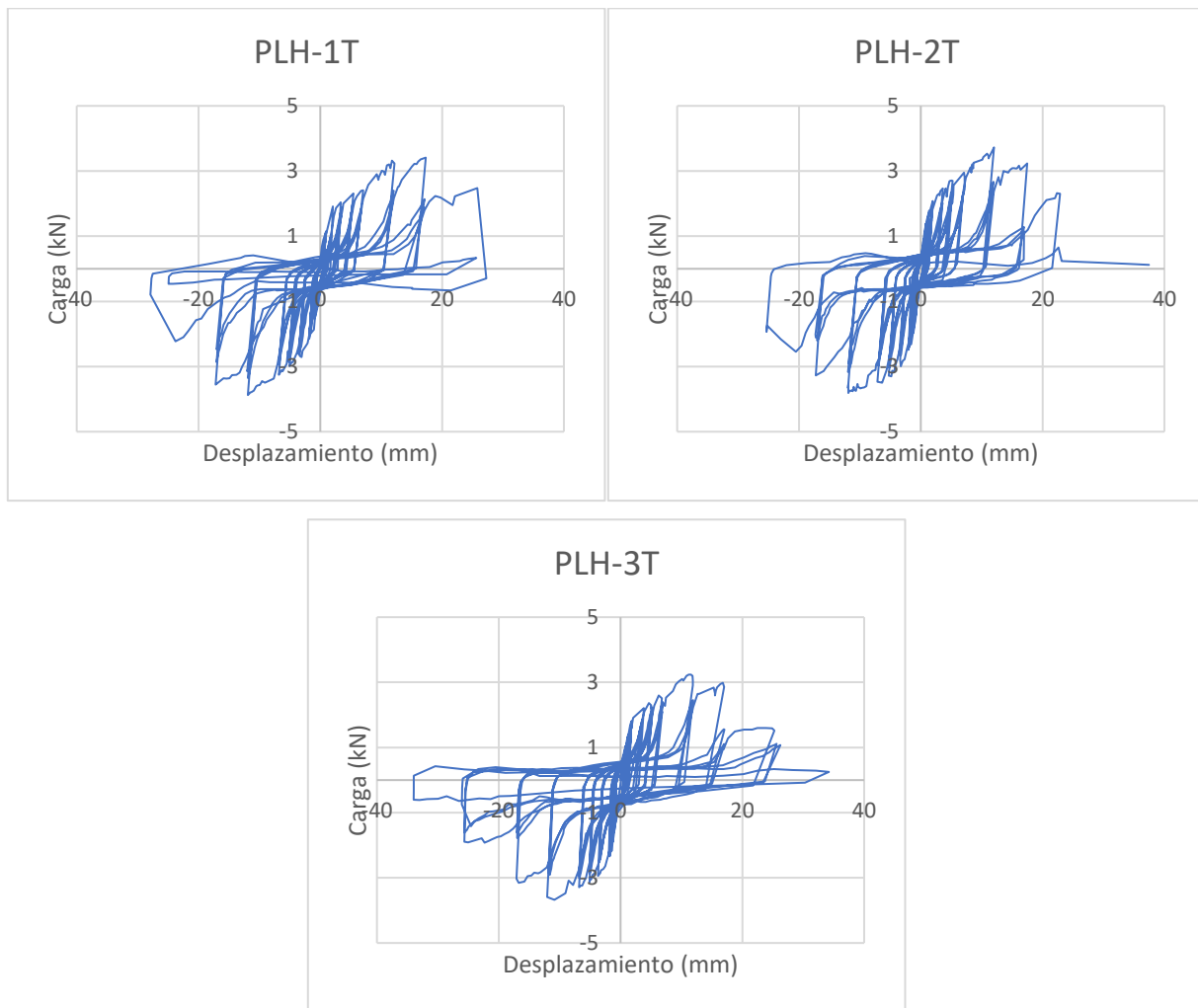
### Respuesta cíclica probetas OSB-Clavo helicoidal



Respuesta cíclica probetas OLB-Clavo anular



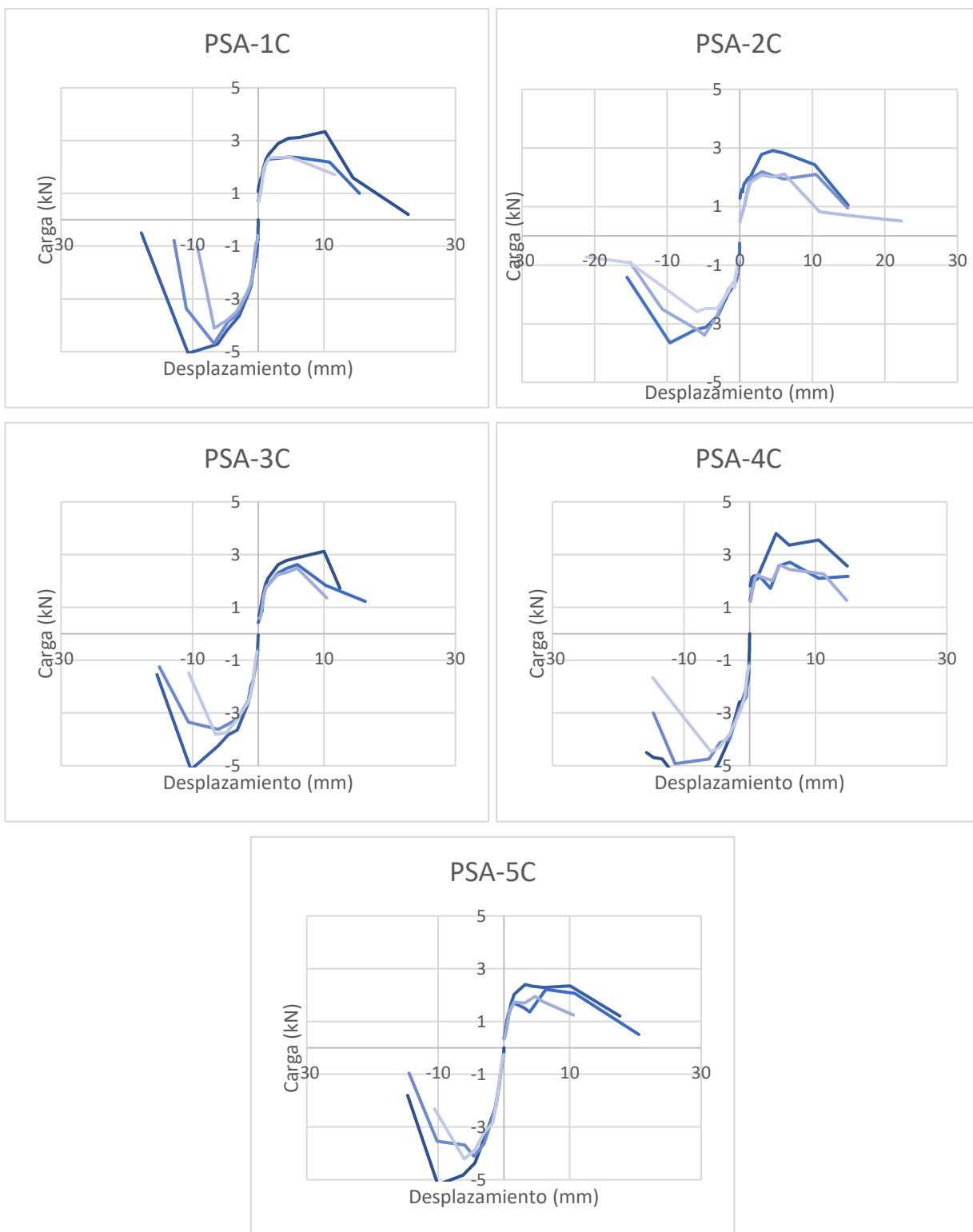
### Respuesta cíclica probetas OLB-Clavo helicoidal



## Anexo E

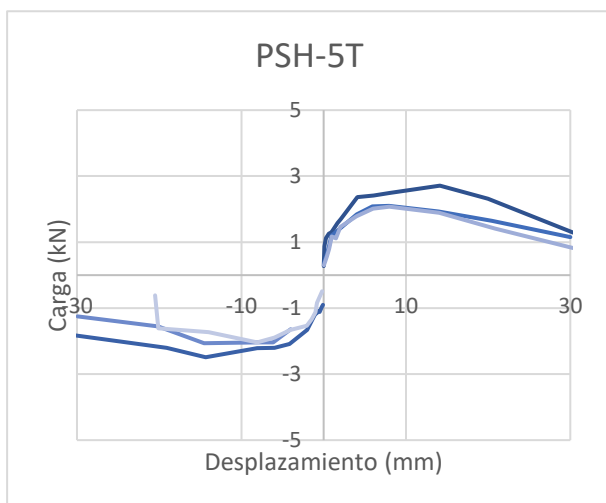
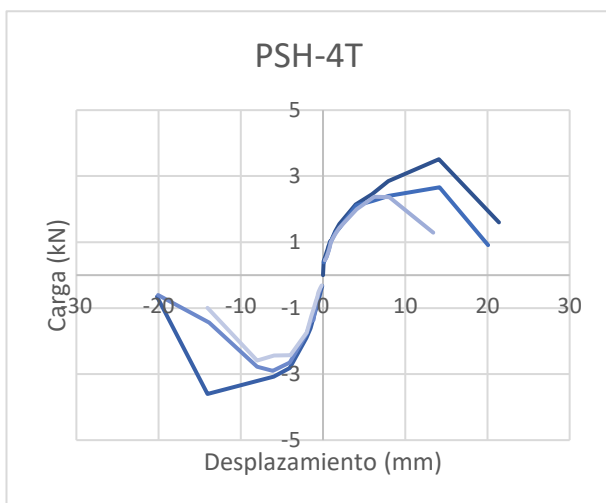
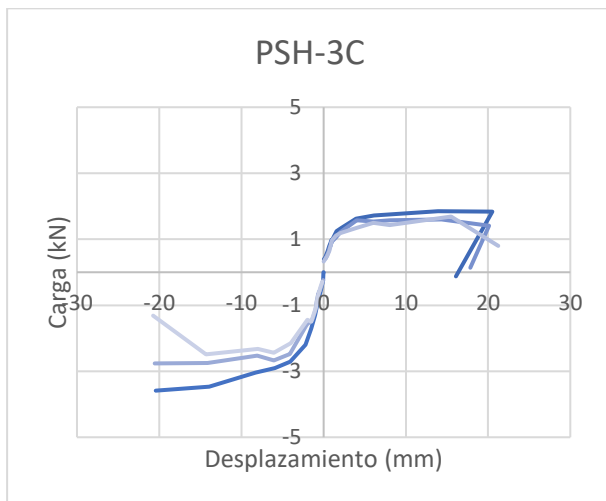
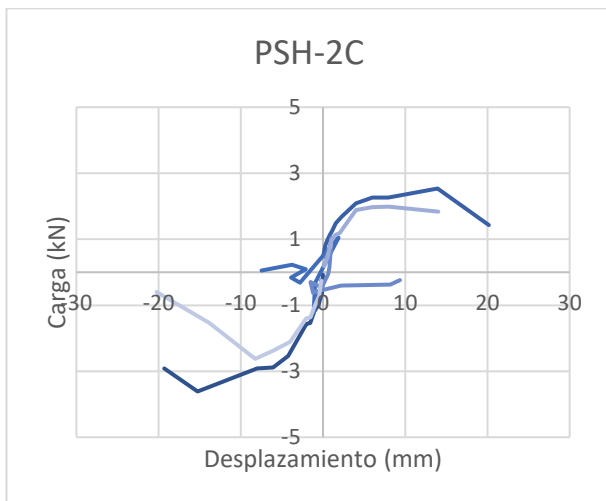
### Envolvente de los primeros, segundos y terceros ciclos

Configuración OSB-Clavo anular

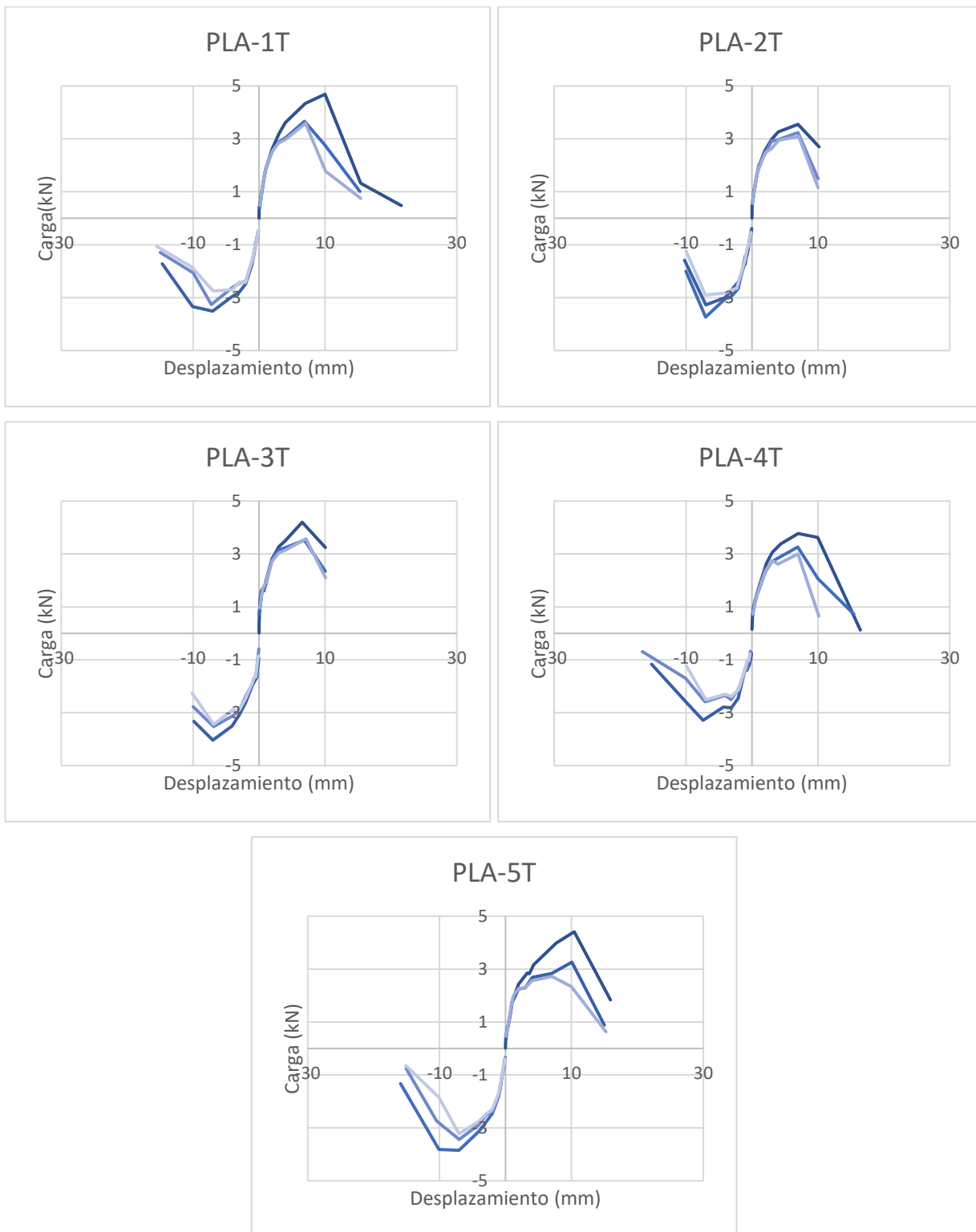




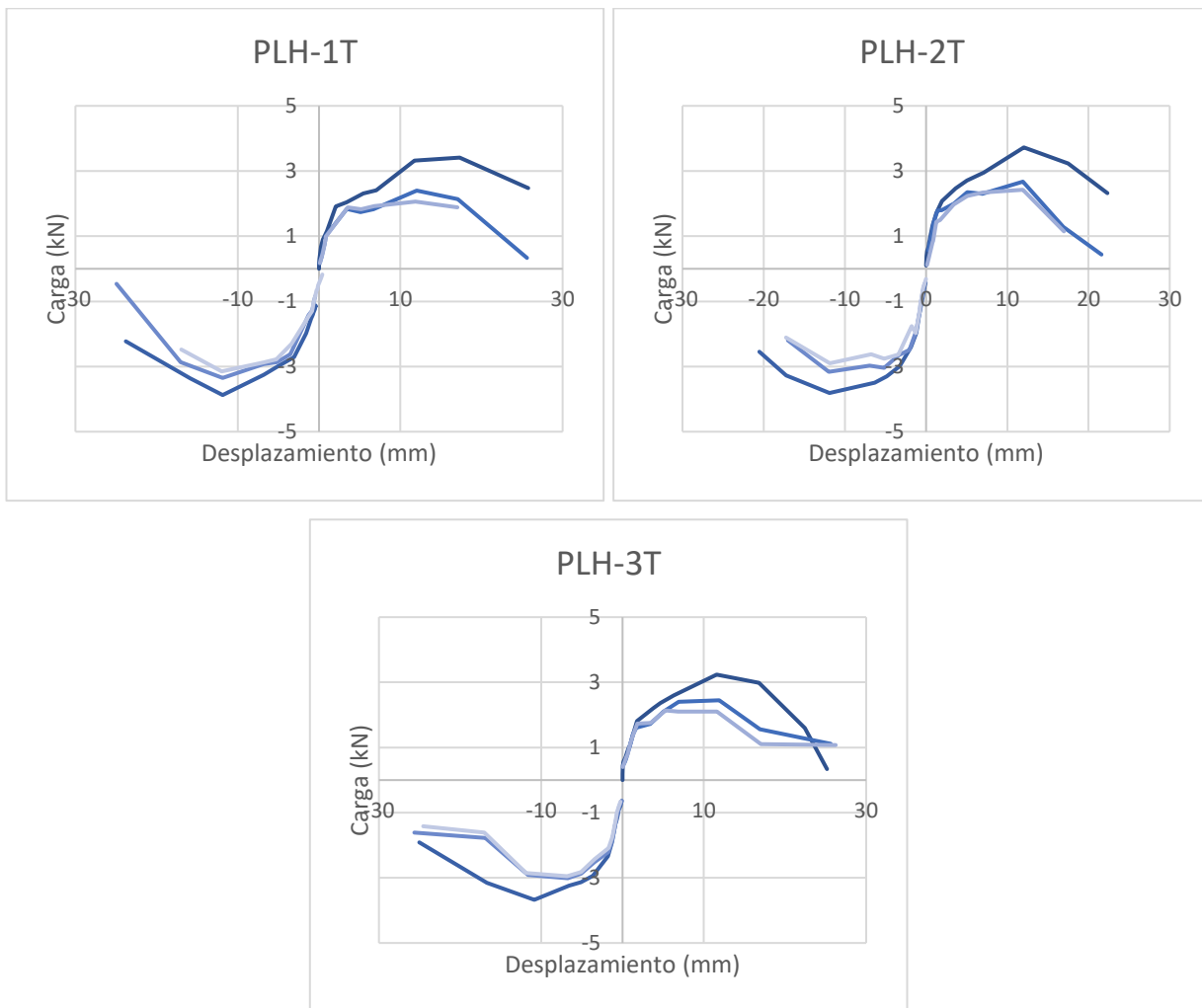
Configuración OSB-Clavo helicoidal



Configuración OLB-Clavo anular



Configuración OLB-Clavo helicoidal



## Anexo F

### Propiedades mecánicas de los ensayos de carga cíclica

Valores promedio entre los subciclos de tracción y compresión

Ensayo	Fy (kN)	Dy (mm)	Fmáx. (kN)	Dfmáx. (mm)	Fúlt. (kN)	Dúlt. (mm)	Rigidez (kN/mm)	Ductilidad
PSA-1C	2.15	1.00	4.24	9.35	3.39	12.68	2.23	13.11
PSA-2C	2.05	1.10	3.30	6.99	2.64	11.28	1.86	10.25
PSA-3C	2.53	1.34	4.14	10.11	3.31	12.09	1.87	9.37
PSA-4C	2.65	1.10	4.92	6.69	3.94	12.55	2.46	12.18
PSA-5C	2.82	1.63	3.81	6.42	3.05	12.93	1.73	9.19
<b>Promedio</b>	2.44	1.23	4.08	7.91	3.26	12.30	2.03	10.82
<b>DESV.</b>	0.29	0.23	0.53	1.52	0.43	0.58	0.27	1.56
<b>CV</b>	0.12	0.18	0.13	0.19	0.13	0.05	0.13	0.14
PSH-2C	1.80	1.90	3.08	14.58	2.46	17.53	0.98	9.93
PSH-3C	1.79	2.20	2.73	14.22	2.18	20.16	0.84	9.25
PSH-4T	2.39	2.65	3.59	13.92	2.87	16.70	0.90	6.30
PSH-5T	1.89	2.30	2.69	13.26	2.16	17.78	0.82	7.72
<b>Promedio</b>	1.97	2.26	3.02	13.99	2.42	18.04	0.88	8.30
<b>DESV.</b>	0.25	0.27	0.36	0.48	0.29	1.29	0.06	1.40
<b>CV</b>	0.13	0.12	0.12	0.03	0.12	0.07	0.07	0.17
PLA-1T	2.85	1.99	4.10	8.53	3.28	11.81	1.43	5.93
PLA-2T	2.52	1.93	3.89	6.86	3.12	9.22	1.47	5.31
PLA-3T	2.48	1.65	4.18	6.64	3.34	9.60	1.51	5.82
PLA-4T	2.40	1.65	3.60	7.11	2.88	11.28	1.44	6.86
PLA-5T	2.43	1.53	4.13	8.75	3.31	12.08	1.61	8.04
<b>Promedio</b>	2.53	1.75	3.98	7.58	3.18	10.79	1.49	6.39
<b>DESV.</b>	0.16	0.18	0.21	0.88	0.17	1.17	0.07	0.96
<b>CV</b>	0.06	0.10	0.05	0.12	0.05	0.11	0.04	0.15
PLH-1T	2.19	2.05	3.64	14.60	2.92	18.30	1.06	8.99
PLH-2T	2.38	1.76	3.77	11.98	3.02	17.23	1.36	10.37
PLH-3T	2.30	2.40	3.46	11.05	2.77	16.78	0.96	7.31
<b>Promedio</b>	2.29	2.07	3.62	12.54	2.90	17.43	1.13	8.89
<b>DESV.</b>	0.08	0.26	0.13	1.50	0.10	0.64	0.17	1.25
<b>CV</b>	0.03	0.13	0.04	0.12	0.04	0.04	0.15	0.14

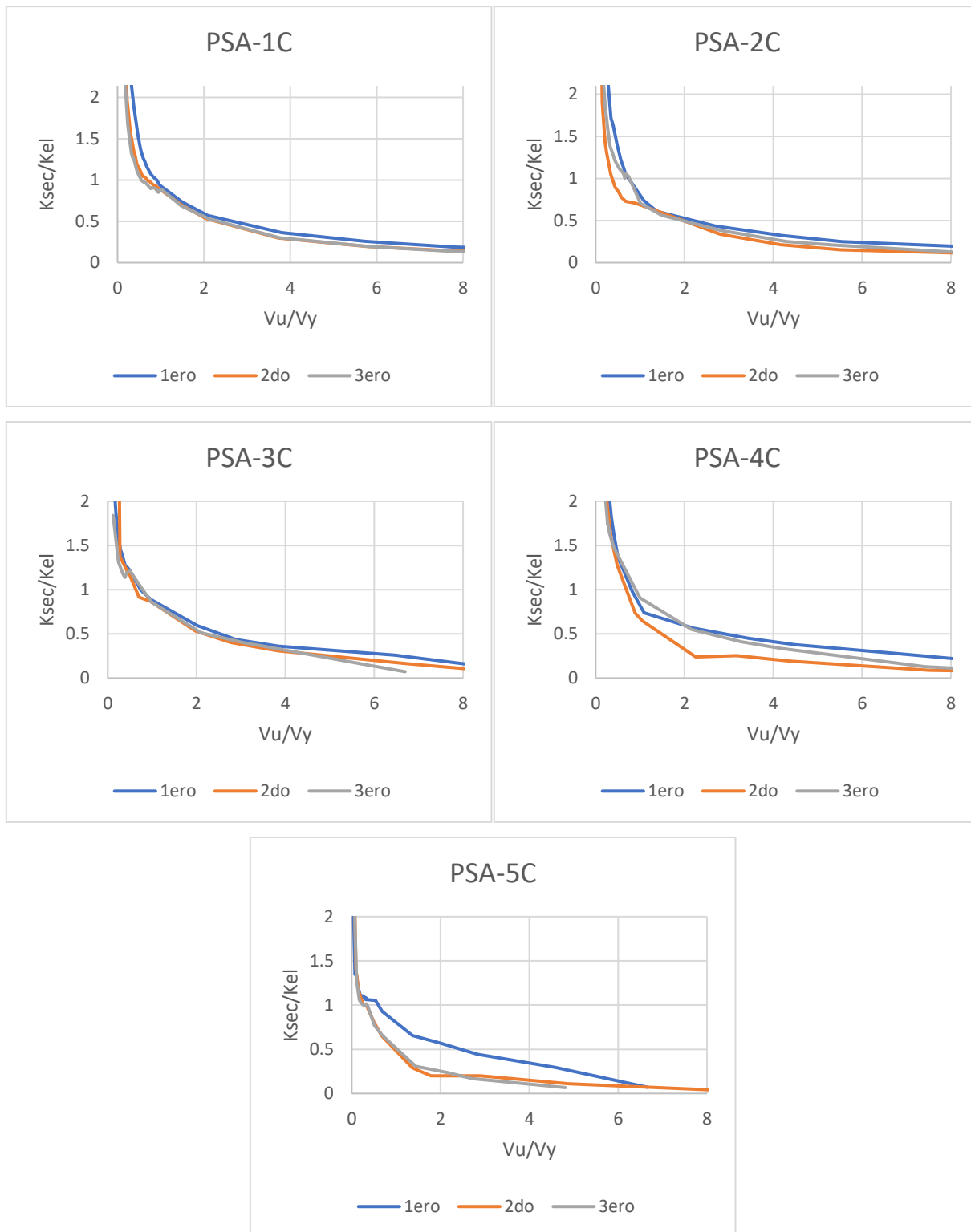
Valores menores entre los subciclos de tracción y compresión

Ensayo	Fy (kN)	Dy (mm)	Fmáx. (kN)	Dfmáx. (mm)	Fúlt. (kN)	Dúlt. (mm)	Rigidez (kN/mm)	Ductilidad
PSA-1C	2.10	0.80	3.34	8.54	2.67	12.20	1.83	10.97
PSA-2C	1.80	1.10	2.95	4.33	2.36	11.00	1.64	10.00
PSA-3C	2.00	1.10	3.13	10.00	2.50	11.75	1.82	7.44
PSA-4C	2.10	0.80	3.80	4.03	3.04	12.00	2.29	9.36
PSA-5C	1.80	1.05	2.40	3.23	1.92	12.55	1.71	5.70
<b>Promedio</b>	1.96	0.97	3.12	6.03	2.50	11.90	1.86	8.69
<b>DESV.</b>	0.14	0.14	0.46	2.71	0.37	0.52	0.23	1.89
<b>CV</b>	0.07	0.14	0.15	0.45	0.15	0.04	0.12	0.22
PSH-2C	1.40	1.30	2.54	13.92	2.03	15.80	0.88	7.70
PSH-3C	1.40	2.00	1.86	8.02	1.49	19.90	0.58	8.29
PSH-4T	2.38	2.60	3.51	13.73	2.81	16.50	0.89	6.26
PSH-5T	1.60	2.00	2.56	13.08	2.05	15.30	0.80	7.65
<b>Promedio</b>	1.70	1.98	2.62	12.19	2.10	16.88	0.79	7.48
<b>DESV.</b>	0.40	0.46	0.59	2.43	0.47	1.80	0.12	0.75
<b>CV</b>	0.24	0.23	0.22	0.20	0.22	0.11	0.16	0.10
PLA-1T	2.50	1.98	3.51	7.03	2.81	11.51	1.25	5.81
PLA-2T	2.43	1.25	3.86	6.76	3.09	8.52	1.00	3.81
PLA-3T	2.00	1.60	4.04	6.28	3.23	9.20	1.18	5.75
PLA-4T	2.00	1.50	3.29	6.79	2.63	10.80	1.33	6.53
PLA-5T	2.40	1.35	3.85	7.07	3.08	11.90	1.41	7.00
<b>Promedio</b>	2.27	1.54	3.71	6.79	2.97	10.39	1.23	5.78
<b>DESV.</b>	0.22	0.25	0.27	0.28	0.22	1.31	0.14	1.09
<b>CV</b>	0.10	0.16	0.07	0.04	0.07	0.13	0.11	0.19
PLH-1T	1.97	2.00	3.41	11.88	2.73	13.10	0.99	6.24
PLH-2T	2.05	1.42	3.73	11.90	2.98	15.40	1.29	7.33
PLH-3T	2.00	2.00	3.24	10.88	2.59	15.10	0.93	5.39
<b>Promedio</b>	2.01	1.81	3.46	11.55	2.77	14.53	1.07	6.32
<b>DESV.</b>	0.03	0.27	0.20	0.48	0.16	1.02	0.16	0.79
<b>CV</b>	0.02	0.15	0.06	0.04	0.06	0.07	0.15	0.13

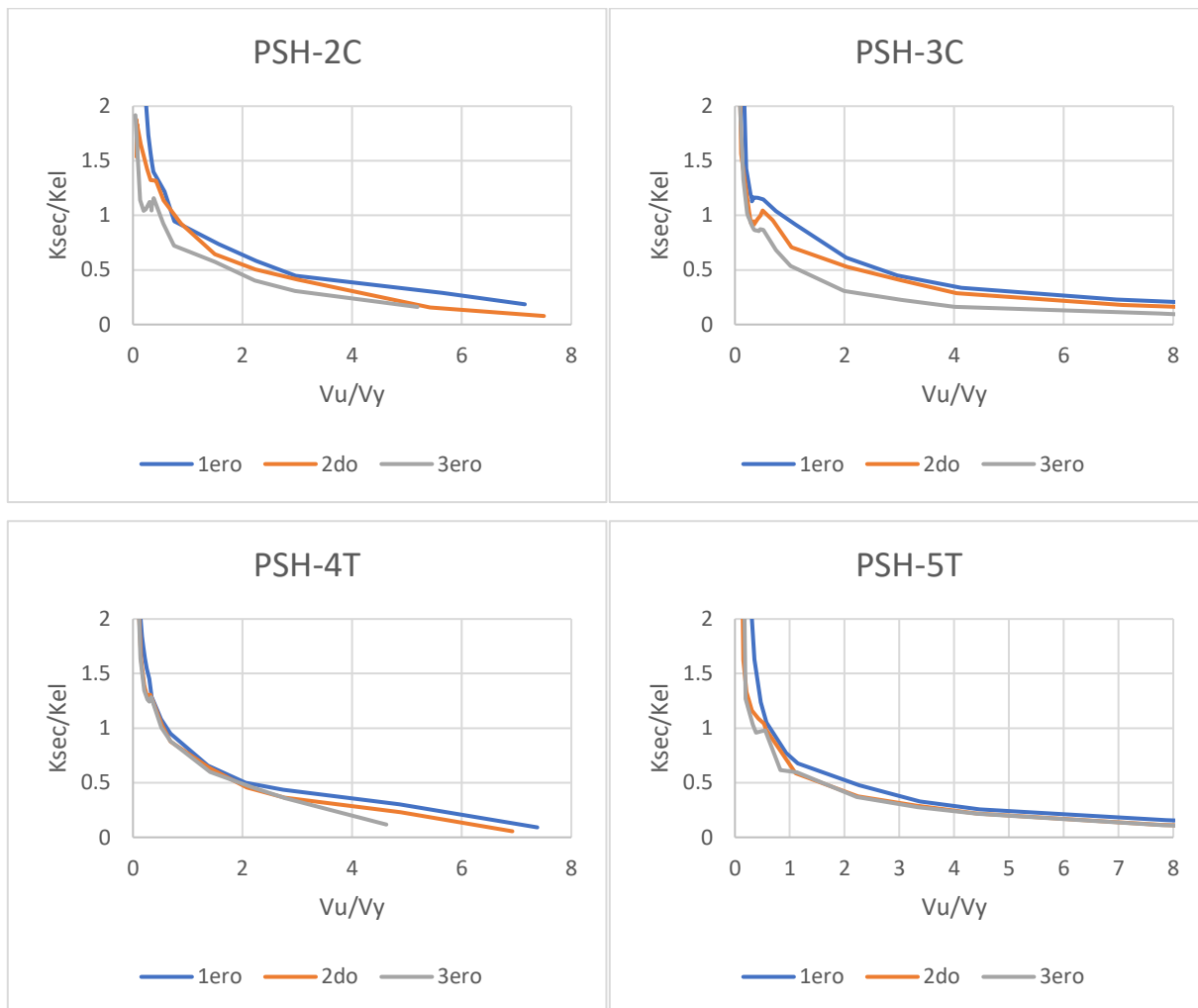
## Anexo G

### Degradación de la rigidez de todas las probetas y tabla para el cálculo del deterioro de resistencia

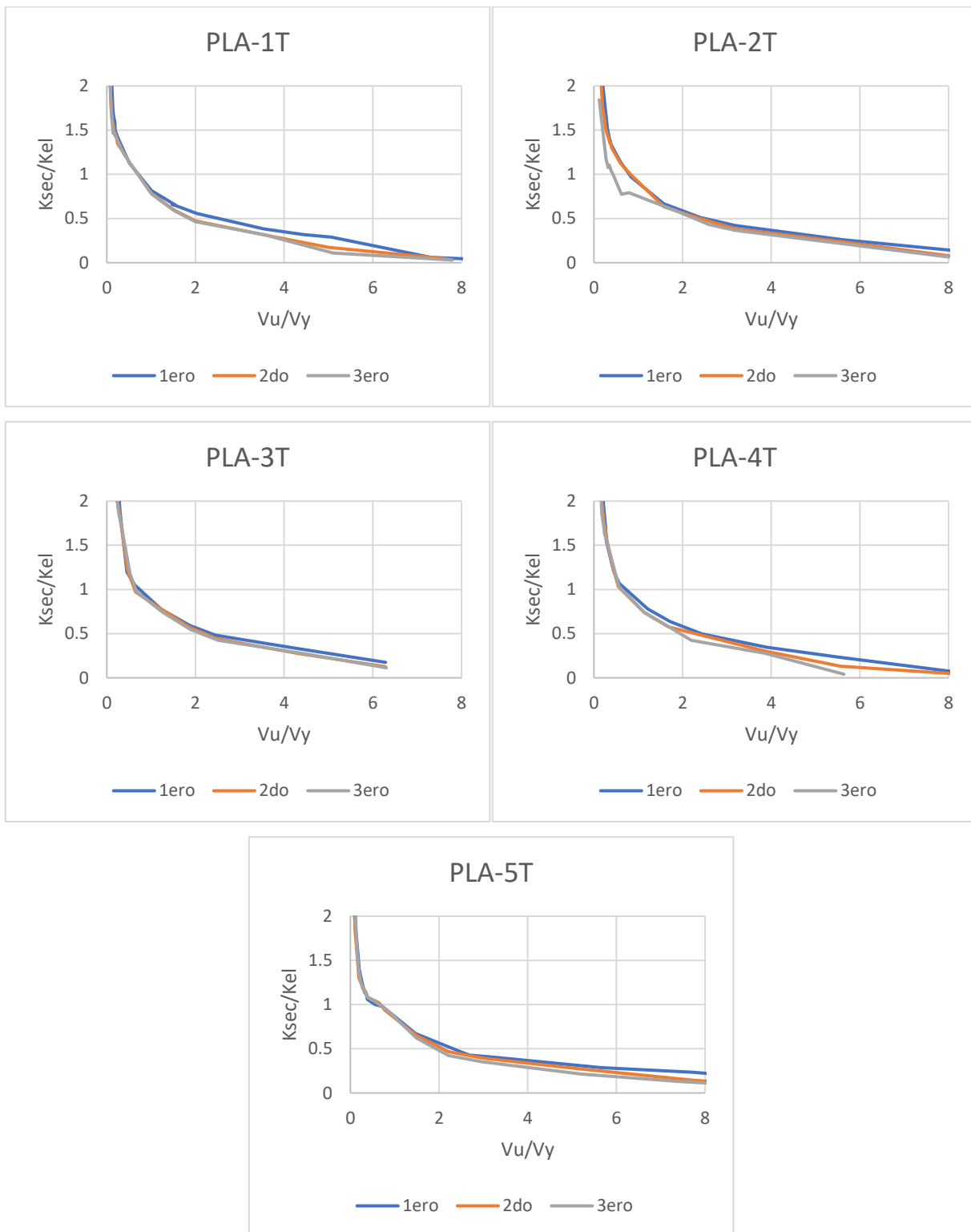
Configuración OSB-Clavo anular



Configuración OSB-Clavo helicoidal

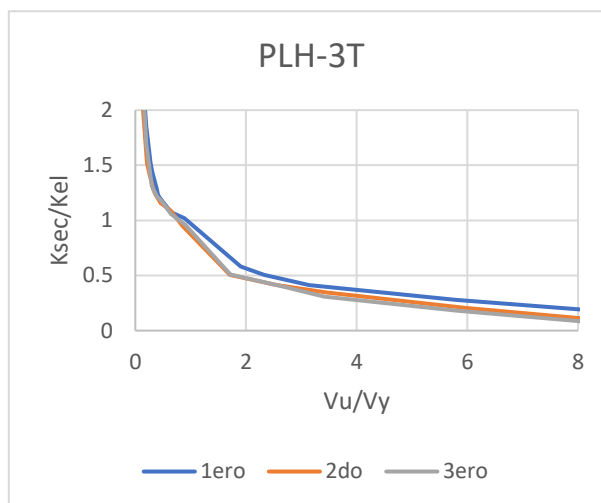
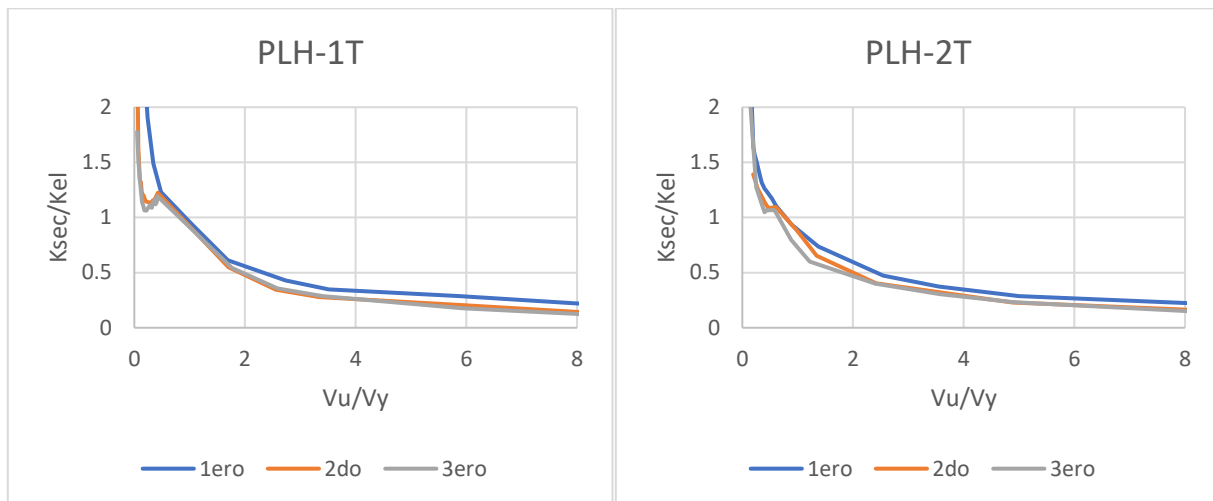


Configuración OLB-Clavo anular





Configuración OLB-Clavo helicoidal



Obtención de valores para el gráfico de deterioro de la resistencia

Configuración	Resistencia Tracción (kN)		Resistencia Compresión (kN)		Máxima diferencia entre ciclos (kN)	
	1ero-2do	1ero-3ero	1ero-2do	1ero-3ero	máx. 1ero-2do	máx. 1ero-3ero
<b>PSA-1C</b>	0.91	0.96	0.45	1.03	0.91	1.03
<b>PSA-2C</b>	0.76	0.84	0.26	0.99	0.76	0.99
<b>PSA-3C</b>	0.50	0.64	1.53	1.96	1.53	1.96
<b>PSA-4C</b>	1.09	1.19	1.11	1.29	1.11	1.29
<b>PSA-5C</b>	0.19	0.45	1.08	1.18	1.08	1.18
<b>PSH-2C</b>	0.41	0.55	0.90	0.99	0.90	0.99
<b>PSH-3C</b>	0.26	0.34	0.83	1.10	0.83	1.10
<b>PSH-4T</b>	0.85	1.14	0.76	1.08	0.85	1.14
<b>PSH-5T</b>	0.73	0.75	0.50	0.53	0.73	0.75
<b>PLA-1T</b>	1.00	1.10	0.19	0.76	1.00	1.10
<b>PLA-2T</b>	0.63	0.78	0.59	1.03	0.63	1.03
<b>PLA-3T</b>	0.53	0.74	0.50	0.60	0.53	0.74
<b>PLA-4T</b>	0.65	0.86	0.70	0.78	0.70	0.86
<b>PLA-5T</b>	1.15	1.69	0.41	0.63	1.15	1.69
<b>PLH-1T</b>	1.01	1.35	0.53	0.73	1.01	1.35
<b>PLH-2T</b>	1.05	1.30	0.65	0.91	1.05	1.30
<b>PLH-3T</b>	0.79	1.10	0.66	0.73	0.79	1.10