



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO  
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO  
MAGÍSTER EN CONSTRUCCIÓN EN MADERA

**PROPIEDADES DE FLEXIÓN DE PANELES DE MADERA LAMINADA CLAVADA DE  
PINO PARA USO EN VIVIENDAS CONSTRUIDAS POR EL SISTEMA  
COOPERATIVO DE AYUDA MUTUA EN URUGUAY**

Autor: Jorge Mario Casaravilla Seijas

Tutor: Alexander Opazo Vega

Cotutora: Laura Moya

Montevideo, 2021

## Resumen

Uruguay cuenta con madera proveniente de plantaciones de rápido crecimiento con potencial para desarrollar productos de ingeniería de madera. Surge así una oportunidad para agregar valor a la cadena productiva forestal-maderera y para el desarrollo de sistemas constructivos que empleen masivamente madera, en particular placas y paneles de madera laminada clavada (NLT). Las placas NLT, que pueden ser empleadas en entresijos, techos y paredes de edificaciones, consisten básicamente en la unión mecánica de un conjunto de tablas para conformar un elemento estructural sólido. Éstas se colocan cara a cara y las uniones se realizan a través de clavos metálicos. El comportamiento estructural del NLT depende principalmente de esta unión mecánica. El objetivo principal de este trabajo de tesis fue estudiar el comportamiento estructural de placas de NLT construidas con madera de *Pinus elliottii*, de luces típicas a las encontradas en viviendas de interés social y analizar si es posible emplear mano de obra no calificada para la construcción de las placas NLT. Para comprender primero el comportamiento de la unión madera-madera, y luego el de las placas estructurales, se construyeron y ensayaron: i) cinco series de pequeños cuerpos de prueba cargados en dirección paralela y perpendicular a las fibras y con diferentes conformaciones, y ii) dos series de placas de tamaño real, una conformada por láminas continuas (PLE) y otra por láminas discontinuas -en una razón de 2/3 y 1/3- intercaladas con las continuas (PLC). Las primeras fueron sometidas a ensayos de resistencia y deslizamiento de acuerdo a UNE EN 26891 (1991) para determinar la capacidad portante de la conexión y el módulo de deslizamiento instantáneo ( $K_s$ ). Se evaluaron los modos de falla y la deformación de los clavos sometidos a simple y doble plano de corte según la teoría de Johansen (1991). Las placas de tamaño estructural fueron ensayadas en flexión de 4 puntos de acuerdo a EN 408 (AENOR 2016), y se determinaron sus propiedades mecánicas y se registraron sus modos de falla. Los resultados mostraron que en las uniones clavadas es relevante la cantidad de láminas a atravesar, que la dirección de las fibras incide de manera importante en el módulo de deslizamiento ( $K_s$ ) y que el rozamiento entre las láminas tiene incidencia en la resistencia de los cuerpos de prueba. Se observó que todas las placas NLT mantuvieron un comportamiento elástico hasta la rotura. Las placas NLT conformadas por láminas continuas (PLE) presentaron valores de módulo de elasticidad y módulo de rotura significativamente superiores que los valores correspondientes a las placas compuestas por láminas discontinuas (PLC). Se observó además, que las uniones clavadas colaboraron en el trabajo conjunto de las láminas y que los modos de rotura de las placas se debieron a fallas por tracción, originados mayormente por desviaciones de las fibras muy pronunciadas y por desviaciones debidas a la presencia de nudos o zonas nudosas. Finalmente, se verificó que este sistema constructivo es apropiado para ser usado en la construcción de viviendas cooperativas construidas con mano de obra no calificada.

Palabras clave: Madera laminada clavada (NLT), *Pinus elliottii*, Uniones clavadas, clavos espiralados, Módulo de deslizamiento, Teoría de Johansen, MOE, MOR, modos de falla.

## Tabla de contenidos

Resumen	1
Tabla de contenidos	2
Índice de figuras	4
Índice de tablas	6
Abreviaturas	7
1 Introducción	8
1.1 Presentación del problema	8
1.2 Hipótesis y objetivos	9
1.3 Metodología de desarrollo	10
1.4 Desarrollo y estructura de la tesis	11
2 Marco teórico	12
2.1 Introducción	12
2.2 Conformación de los elementos	13
2.3 Fabricación y montaje	15
2.4 Propiedades de elementos laminados clavados	17
2.5 Aplicaciones de las placas NLT	19
2.6 Revisión bibliográfica	20
3 Comportamiento mecánico de uniones de madera de pino uruguayo con clavos de pequeño diámetro	23
3.1 Introducción	24
3.2 Materiales y métodos	26
3.3 Presentación y discusión de los resultados	35
3.4 Conclusiones	49
4 Determinación experimental de las propiedades de flexión de placas de madera laminada clavada construidas con pino uruguayo.	50

4.1	Introducción	50
4.2	Materiales y métodos	53
4.3	Presentación y discusión de los resultados	60
4.4	Conclusiones	73
5	Uso de placas laminadas clavadas (NLT) en viviendas cooperativas construidas por el sistema de ayuda mutua.	74
5.1	Resumen	74
5.2	Introducción	75
5.3	Consideraciones generales	77
5.4	Facilidad y tiempo de armado de los paneles	78
5.5	Facilidad de transporte y montaje en obra	80
5.6	Capacidad portante	81
5.7	Conclusiones.	83
6	Conclusiones	84
7	Referencias bibliográficas.	87
	Anexos.	91

## Índice de figuras

Figura 1. Placa de madera laminada clavada. . Fuente: Timber Buildings and Sustainability .....	12
Figura 2. Ensamblado de las placas NLT mediante clavos. ....	13
Figura 3. Esquema de clavado mostrando desfasaje de clavos .....	14
Figura 4. Placas curvas de NLT. Brentwood Station, Burnaby, BC. Canadá. (foto: Ted McGrath.Flickr-2021).....	19
Figura 5. Algunos ejemplos de terminaciones de placas NLT. ....	20
Figura 6. Modos de falla posibles en conexiones con simple y doble cizalle según Johansen (1949). ....	25
Figura 7. Capacidad portante para cada modo de rotura según Johansen.....	26
Figura 8. Clavadora neumática y clavos espiralados.....	27
Figura 9. Conexiones clavadas preparadas para transmitir carga paralela a las fibras. Tablas de 35mm. a1=80; a2=65; a3=40; a4=40. (Dimensiones en mm).....	28
Figura 10. Conexiones clavadas preparadas para transmitir carga paralela a las fibras. Tablas de 50mm. a1=80; a2=65; a3=40; a4=40. (Dimensiones en mm).....	29
Figura 11. Conexiones clavadas preparadas para transmitir carga perpendicular a las fibras. a1=35; a2=35; a3=38; a4=38. (Dimensiones en mm).....	30
Figura 12. Conexiones clavadas preparadas para transmitir carga paralela a las fibras. 9 láminas de 35mm.....	31
Figura 13. Equipamiento para ensayos de Fing, Udelar .....	32
Figura 14. Ensayos de corte. Aplicación de carga de compresión en dirección a) paralela a la fibra, y b) perpendicular a la fibra .....	32
Figura 15. Ciclo de carga para ensayos de conexiones múltiples, según norma EN26891.....	33
Figura 16 Configuración de ensayo de flexión en tres puntos y curva típica de carga-deformación de acuerdo a ASTM F 1575 .....	35
Figura 17 . Gráfica carga – desplazamiento. Ensayo de clavos espiralados 3.1 mm de diámetro. ....	36
Figura 18. Gráficas carga – desplazamiento de las probetas de la serie PA35 Detalle zona elástica...	37
Figura 19. Gráficas carga – desplazamiento de las probetas de la serie PA50 Detalle zona elástica...	37
Figura 20. Piezas sometidas a doble cizalle (serie PA35) con deformaciones de los clavos luego de ser ensayados. ....	40

Figura 21. Piezas sometidas a cizalle simple (serie PA50) con deformaciones de los clavos luego de ser ensayados .....	41
Figura 22. Gráficas carga – desplazamiento de las probetas de la serie PP35   Detalle zona elástica..	42
Figura 23. Piezas sometidas a cizalle doble (Serie PT35) con deformaciones de los clavos luego de ser ensayados. ....	44
Figura 24. Probeta luego de aplicar cargas y fuerzas de corte.....	45
Figura 25. Curvas carga – desplazamiento. Serie P9C   Detalle zona elástica.....	45
Figura 26. Curvas carga – desplazamiento. Serie P9S   Detalle zona elástica .....	46
Figura 27. Deformación de los clavos luego de la aplicación de las cargas. Serie P9S. ....	48
Figura 28. Detalle de deformaciones en clavos. ....	48
Figura 29 Penetración de los clavos en las piezas de madera.....	54
Figura 30. Distribución de láminas dentro de cada placa según MOE. ....	56
Figura 31. Conformación de placas NLT. a) PLE; b) PLC (planta y vista frontal).....	57
Figura 32 Características constructivas de los paneles y su armado. a) Clavado de la última lámina; b) detalle de juntas a tope (“Butt joints”); c) placas. ....	58
Figura 33 Esquema de ensayo. ....	59
Figura 34 Configuración del ensayo a flexión de las placas de tamaño estructural .....	59
Figura 35. Gráfico relación entre MOE y densidad. ....	60
Figura 36. Ensayo de placas NLT. Gráficos carga desplazamiento. a) placas PLC, b) placas PLE .....	62
Figura 37. MOE placas. a) serie PLC, b) serie PLE.....	64
Figura 38. Placa durante el ensayo.....	68
Figura 39. Placa luego de alcanzar la rotura.....	68
Figura 40. Diferentes modos de rotura de las placas.a) desviación de las fibras, b) y e) presencia de nudo + desviación de las fibras, c) y d), presencia de nudos. ....	70
Figura 41. Diferentes modos de rotura de las placas. a) presencia de nudo b) desviación de las fibras, c) varios, d) presencia de nudo + desviación de las fibras, e) rotura de fibras sin presencia de defectos y f), presencia de médula + nudos. ....	71
Figura 42. Caballete para armado de placas y paneles.....	78

Figura 43. Procedimiento de armado de las placas. a) selección de láminas, b) marcado del patrón de clavado, c) clavado de láminas con clavadora neumática. .... 79

## Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de ensayos de cuerpos de prueba correspondientes a la Serie PA35, realizados de acuerdo a UNE EN 26891 (1991) .....	38
Tabla 2. Resultados de ensayos de cuerpos de prueba correspondientes a la Serie PA50, realizados de acuerdo a UNE EN 26891 (1991) .....	38
Tabla 3. Resultados de ensayos de cuerpos de prueba correspondientes a la Serie PT35, realizados de acuerdo a UNE EN 26891 (1991) .....	42
Tabla 4. Resultados de ensayos de cuerpos de prueba correspondientes a las Series P9S y P9C, realizados de acuerdo a UNE EN 26891 (1991) .....	46
Tabla 5. Valores medios de MOE y densidad de las láminas que componen cada placa. a) placas PLE, b) placas PLC .....	61
Tabla 6. Las tablas muestran los valores de carga (N) y deformación (mm) registrados para cada placa al momento de producirse la primera rotura (1er Crack) y al momento de alcanzar su carga máxima. También se expresan las diferencias entre estos valores y la relación porcentual entre los valores registrados en estos 2 momentos .....	63
Tabla 7. Cuadro comparativo valores MOE promedio de las láminas que conforman las placas y valores MOE de cada placa de la serie PLE. ....	65
Tabla 8. Cuadro comparativo valores MOE promedio de las láminas que conforman las placas y valores MOE de cada placa de la serie PL. ....	65
Tabla 9. Carga máxima y MOR de cada placa. a) serie PLE, b) serie PLC .....	66

## Abreviaturas

NLT: *nail-laminated timber* (madera laminada clavada)

CLT: *cross-laminated timber* (madera contralaminada)

DLT: *dowel-laminated timber* (madera laminada tarugada)

GLT: *glue-laminated timber* (madera laminada encolada)

OSB: *oriented strand board* (tablero de viruta orientada)

CH: contenido de humedad

Ks: módulo de deslizamiento instantáneo

$\rho_k$ : densidad

F: carga o fuerza

COV: coeficiente de variación

PA35: cuerpos de prueba conformados por 3 piezas de madera de 145mm x 35mm x 300mm clavadas entre si

PA50: cuerpos de prueba conformados por 3 piezas de madera de 145mm x 50mm x 300mm clavadas entre si

PP35: cuerpos de prueba conformados por 2 piezas de madera horizontales de 145mm x 35mm x 450mm y una de 145mm x 35mm x 300mm colocada de manera vertical entre ellas. clavadas entre si.

P9S: cuerpos de prueba conformados por 9 piezas de madera de 145mm x 35mm x 350mm clavadas entre sí con sus caras colocadas en sentido paralelo a las fibras

P9C: cuerpos de prueba conformados por 9 piezas de madera de 145mm x 35mm x 350mm clavadas entre sí con sus caras colocadas en sentido paralelo a las fibras, con un film de polietileno entre cada una de las piezas

PLE: placa NLT conformada láminas enteras

PLC: placa NLT conformada por láminas discontinuas intercaladas con las enteras

MOE: módulo de elasticidad

MOR: módulo de rotura

NDT: (ensayos) no destructivos

MVOT: Ministerio De Vivienda y Ordenamiento Territorial

LATU: Laboratorio Tecnológico del Uruguay

UDELAR: Universidad de la República Oriental del Uruguay

SCT: sistema constructivo tradicional

SCNT: sistema constructivo no tradicional



# **1 Introducción**

## **1.1 Presentación del problema**

### **1.1.1 Demanda de sistemas alternativos de construcción para el sistema cooperativo**

El sistema cooperativo para la construcción de viviendas de interés social en Uruguay ha sido clave en la política de viviendas dirigidas a sectores de nivel socioeconómico medio y medio-bajo. En particular, el sistema por ayuda mutua en el que los futuros usuarios participan en la construcción de sus viviendas ha sido clave en el éxito de estas políticas. Esta modalidad, basada en la participación activa en la construcción de la vivienda, se ha visto dificultada en los últimos años debido a diversos factores como los cambios en los núcleos de personas que conforman los grupos o la menor disponibilidad de horas libres para participar en la construcción. Es por ello que la producción de viviendas en la modalidad cooperativa por ayuda mutua necesita incorporar nuevos sistemas que optimicen la participación de los futuros usuarios en el proceso constructivo.

El sistema más utilizado hoy es el de albañilería tradicional, pero éste adolece de algunos problemas: necesidad de mano de obra especializada (lo que reduce la participación de los cooperativistas en los procesos de obra básicamente a tareas de peón), altos costos y prolongados tiempos de obra. Actualmente el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOT) promueve, mediante normativas específicas, la incorporación de sistemas constructivos prefabricados, industrializados o no, de modo de ampliar el espectro de posibilidades constructivas, bajar tiempos de obra y abaratar costos sin perder calidad.

### **1.1.2 La madera para fines constructivos**

Desde comienzos de este siglo, de la mano de reforzar las miradas sustentables en el uso de los recursos, la construcción con nuevos sistemas constructivos que emplean masivamente madera, denominados “mass timber”, han ganado un lugar importante, ya no solo como alternativa para la construcción de edificios sino como el camino a seguir en los próximos años. Además de tratarse de sistemas constructivos que implican en todo su proceso una menor huella de carbono, la construcción en madera ofrece otras ventajas como la reducción de tiempos de obra y la baja de los costos de construcción. En el marco del Acuerdo de París (Naciones Unidas 2015), por tanto, la adopción de estos sistemas cobra relevancia a nivel mundial; la posibilidad de reducir tanto los tiempos de ejecución como las cada vez mejores prestaciones que ofrecen estos sistemas ha impulsado el desarrollo tecnológico de soluciones incluso para la construcción en altura. Hoy las limitaciones para construir en madera se encuentran en la normativa y no en las soluciones tecnológicas que se ofrecen. (Ramage, 2017)

Por lo tanto, como la demanda por el uso de madera en construcciones de edificios continúa creciendo, el suministro sostenible de madera para fines estructurales es de gran importancia.

### 1.1.3 Oferta de madera para fines constructivos en Uruguay

Uruguay se encuentra en un momento óptimo para desarrollar sistemas constructivos en madera que permitan agregar valor en la cadena productiva forestal-maderera, donde 2 especies son las principales protagonistas: el eucalipto y el pino, ya que el país cuenta actualmente con 1,7 millones m<sup>3</sup> de pino (principalmente *Pinus taeda* y *Pinus elliotii*) y 0,4 millones m<sup>3</sup> de eucalipto (principalmente *Eucalyptus grandis*) que no tienen destino industrial aún (Dieste 2012).

Es allí entonces donde existe una oportunidad para agregar valor a la mencionada cadena, a través del desarrollo de sistemas constructivos que empleen masivamente madera, en particular placas de madera laminada clavada/tarugada (NLT/DLT) para su empleo en entresijos, techos y paredes de edificaciones residenciales. Estas placas pueden ser producidas en las dimensiones habituales para las viviendas de interés social, de modo tal que su fabricación y/o manipulación permita la participación de mano de obra no especializada.

Por otra parte, estas tecnologías constructivas permiten edificar en altura, pudiendo así concentrar varias unidades de vivienda en un mismo predio dentro de la trama urbana, aportando positivamente a la densificación de las áreas centrales de las ciudades, objetivo ampliamente impulsado por los últimos planes de ordenamiento territorial promulgados para diferentes zonas y ciudades del país.

Estas tecnologías, además, que en los países desarrollados se aplican cada vez más para la construcción de edificios residenciales de varios niveles, en Uruguay podrían utilizarse no sólo en vivienda social, sino también en conjuntos residenciales destinados a sectores de la población con ingresos medios-altos.

El empleo masivo de madera permitirá utilizar el recurso forestal que actualmente no tiene destino industrial y contribuirá en la mitigación de los efectos de las emisiones de dióxido de carbono.

## 1.2 Hipótesis y objetivos

### 1.2.1 Hipótesis

Las placas de madera laminada clavada de pinos (*Pinus elliotii*) cultivados en Uruguay presentan propiedades estructurales aptas para su empleo en conjuntos residenciales y, en particular, pueden ser construidos por los usuarios del sistema de cooperativas de viviendas en la modalidad de “ayuda mutua”.

### 1.2.2 Objetivo general

Analizar el comportamiento en flexión de placas de madera laminada clavada (NLT) de pinos uruguayos con luces típicas encontradas en proyectos de viviendas, y evaluar la factibilidad de que el proceso de fabricación sea adoptado por usuarios de cooperativas de vivienda por ayuda mutua.

### 1.2.3 Objetivos específicos

- Diseñar y construir paneles de madera laminada clavada empleando clavos espiralados.
- Estudiar experimentalmente el comportamiento mecánico de las uniones madera-madera mediante ensayos destructivos en pequeños cuerpos de prueba.
- Determinar experimentalmente las propiedades de flexión de placas NLT mediante ensayos destructivos.
- Analizar si es posible emplear mano de obra no calificada para la construcción de placas NLT según criterios de facilidad y tiempo de armado, transportabilidad, puesta en obra, seguridad e higiene laboral.

### 1.3 Metodología de desarrollo

El programa empírico incluyó ensayos de uniones de cuerpos de prueba de pequeñas dimensiones, y ensayos de placas de tamaño estructural. En los capítulos 3, 4 y 5 se presentan en detalle los materiales y los métodos empleados en el desarrollo del trabajo.

Para el programa experimental se tomaron como base los criterios establecidos en las normas europeas ya que Uruguay se encuentra trabajando en la conformación de un cuerpo normativo para la madera estructural que incluya desde caracterización de productos hasta reglas de diseño que toma como base el corpus normativo europeo.

Previo al estudio de las placas NLT de tamaño estructural, y debido a la inexistencia de datos experimentales sobre las uniones madera-madera, se decidió realizar un total de 32 ensayos normalizados (EN 1380 2009; UNE EN 26891 1991) destinados a conocer el comportamiento mecánico de conexiones construidas con tablas de madera aserrada de *Pinus elliottii*. Adicionalmente se llevaron a cabo 49 pruebas estandarizadas (ASTM-F1575 2017) para determinar el momento de plastificación en los elementos de fijación (clavos) de pequeño diámetro.

Posteriormente, se realizaron 14 ensayos de flexión de placas NLT de tamaño estructural para determinar sus propiedades de flexión de acuerdo a la norma EN 408 (2016).

Finalmente, se realizaron evaluaciones con la finalidad de analizar si es posible emplear mano de obra no calificada para la construcción de las placas NLT según criterios de facilidad y tiempo de armado, transportabilidad, puesta en obra, seguridad e higiene laboral. Para ello se midieron tiempos de ejecución, se evaluaron pesos de las placas y se los contrastó con las normativas de seguridad e higiene en obra vigentes en nuestro país. Se realizaron también consideraciones parciales acerca de la incidencia de este sistema en los costos de obra. La capacidad portante de las placas se evaluó mediante cálculos estáticos y dinámicos considerando las cargas habituales en este tipo de proyecto.

#### **1.4 Desarrollo y estructura de la tesis**

El trabajo de tesis se desarrolló en tres etapas: i) la primera focalizó en el estudio de las uniones maderas-madera, ii) la segunda dedicada a analizar el comportamiento de las placas de tamaño estructural, y iii) la tercera a cuantificar los tiempos de construcción y viabilidad de fabricación de los paneles empleando mano de obra no calificada.

La tesis está estructurada en 7 capítulos. El capítulo 1 presenta la situación forestal y la disponibilidad de madera de producción nacional en Uruguay. El capítulo 2 describe la conformación, propiedades y campos de aplicación de este tipo de placas y revisa el estado del arte a nivel internacional. Los capítulos 3 y 4, escritos en formato de artículos científicos, focalizan en el estudio del comportamiento mecánico de las uniones clavadas y en la determinación experimental de las propiedades de flexión de las placas de madera laminada clavada. El capítulo 5 se centra en el análisis de la aplicación de placas y paneles NLT en la construcción de cooperativas de vivienda mediante el uso de mano de obra no calificada. El capítulo 7 sintetiza las conclusiones de la tesis.

## 2 Marco teórico

En el presente capítulo se presenta el estado del conocimiento en lo referente a los paneles de madera laminada clavada. El desarrollo enfatiza los aspectos de mayor importancia para los objetivos trazados en este trabajo.

### 2.1 Introducción

Los elementos laminados clavados de madera (NLT por su sigla en inglés, *nail-laminated timber*) forman parte de la familia de los productos de madera masiva, junto con los paneles de madera tarugada (DLT), de madera laminada encolada (GLT) y los de madera contra-laminada (CLT).

Consisten básicamente en la unión mecánica de un conjunto de tablas para conformar un elemento estructural sólido. Las placas se colocan cara a cara y las uniones se realizan a través de clavos metálicos.



Figura 1. Placa de madera laminada clavada. . Fuente: [Timber Buildings and Sustainability](#)

Debido a las luces que puede alcanzar salvar y la resistencia le permite ser una alternativa al uso de componentes de hormigón y acero en la construcción de edificios. El proceso de laminado permite minimizar las características reductoras de resistencia propias de la madera, como nudos o desviación de la fibra, logrando una pieza estructural que presenta propiedades de resistencia y rigidez más uniformes que las de las tablas de madera aserrada que constituyen la placa (Ogunrinde 2019). Las placas pueden ser utilizadas en losas, paredes, pilares pantalla, cajas de ascensor y escaleras.

Se trata de un material antiguo que hoy, internacionalmente, goza de un renovado interés. Su aplicación se remonta a las construcciones tradicionales de madera maciza de principios del siglo XIX, donde ciertos edificios históricos con entramado de madera pesada y revestimiento de ladrillo incorporaban placas de NLT para pisos y entresijos de fábricas y almacenes. En América del Norte desde la década de 1920 hasta mediados de la década de 1960, la mayoría de las cubiertas transitables de los puentes estaban hechas con paneles de NLT, colocados mayoritariamente de forma transversal al sentido circulatorio.

Actualmente, la tecnología NLT está siendo reconocida, tanto por sus valores económicos como por los ambientales, para su uso en construcciones de madera maciza. (Hong 2014). Ejemplos de su uso con fines estructurales y de diseño en edificios residenciales, estructuras espaciales y estructuras de cubierta pueden encontrarse en toda Europa y en Norteamérica.

Además de las mencionadas, el uso de NLT presenta las siguientes ventajas frente a otros sistemas constructivos: a), utiliza tablas de bajo costo y buena disponibilidad en el medio para transformarlas en un material de construcción de alto valor (Tannert 2002); b), a diferencia del CLT y la GLT, al ser un producto laminado mecánicamente, su resistencia y rigidez son independientes de las propiedades de adhesión de la madera utilizada en su construcción, lo que permite su conformación con madera de baja calidad estructural sin aplicar los procesos complejos de ajuste en su espesor y cepillado, que normalmente se requieren para producir CLT (Lu et al. 2018); c), su resistencia y rigidez es menos variable en comparación con madera maciza y su resistencia característica es mayor que la de la madera maciza de las mismas dimensiones, lo que le permite soportar mayores esfuerzos. (Derikvand et al. 2019); d), al no requerir de instalaciones complejas para su para su fabricación, las placas pueden ser construidas a pie de obra, lo que reduce el tiempo y el costo de construcción del edificio; e), permite generar piezas livianas y de dimensiones acotadas que facilitan su maniobra en obra; f), a partir de piezas simples, pueden desarrollarse proyectos edilicios y de infraestructura de pequeña y mediana escala, posibilitando la construcción en altura en varios niveles. (NLT design & construction Guide, 2017); g), como fue mencionado, debido a su alto factor de carga compartida, la tecnología NLT permite utilizar para la construcción de edificios tableros de media y baja resistencia estructural que pueden ser también combinados con otros de mayor grado resistente. Esto permite personalizar los requisitos estructurales de los componentes de construcción y podría maximizar el uso de tableros de madera de baja resistencia en aplicaciones estructurales (Derikvand et al. 2019).

## 2.2 Conformación de los elementos

Los elementos laminados clavados están conformados por tablas individuales de madera de un espesor de entre 24 mm y 60 mm. Posterior a su secado al  $(15\pm 3)\%$ , estas tablas se colocan juntas cara a cara, puestas de canto, y se unen en la dirección transversal (ver Figura 2).

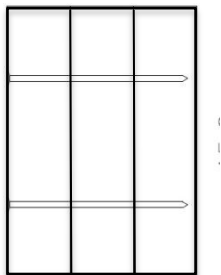


Figura 2. Ensamblado de las placas NLT mediante clavos.

Para la conformación de muros se usan paneles con espesores de 8 cm a 12 cm; para losas, de 12 cm a 24 cm. El ancho de las placas es determinado por la facilidad de manejo en la obra y de su transporte (Tannert, 2002).

La clase y el grado de la madera a utilizar afectan tanto la resistencia como la apariencia del NLT. Además, las especies absorben y liberan agua a diferentes velocidades, lo que debe considerarse si el NLT estará expuesto a humedad significativa durante la construcción. La trabajabilidad y la dureza también difieren entre especies y generalmente se relacionan con su densidad. Esto puede provocar, ligeramente, una mayor resistencia al clavado o al cortado. El grado de clasificación también importa, sobre todo si el NLT queda expuesto como acabado interior, ya que una tabla que clasifica visualmente para cumplir con los requisitos estructurales, puede contar con diversos defectos visuales (rotura de borde, agujeros, nudos grandes). Usar madera seleccionada y de mayor grado estructural puede ser bueno para evitar estos defectos, pero su disponibilidad y costo pueden afectar la viabilidad de cualquier proyecto. (NLT design & construction Guide, 2017)

En este trabajo, las placas son construidas con tablas de madera de calidad corriente y con baja clasificación estructural de las especies *Pinus taeda* y *Pinus ellioti*.

Los clavos, que se colocan a una distancia continua y uniforme, tienen como finalidad transmitir los esfuerzos de corte de una tabla a otra, homogeneizando la sección y distribuyendo cargas puntuales, cumpliendo así la condición de placa (Tannert, 2002). En los casos comunes el clavo pasa por dos tablas y penetra en una tercera. El esquema de clavado tiene que desfasarse una cierta distancia de tabla a tabla para evitar que los clavos coincidan. Un clavo, dependiendo de su longitud y del espesor de la tabla, penetra un cierto número de tablas. Después de este número de tablas, se puede clavar en la misma posición de la tabla. (ver Figura 3)

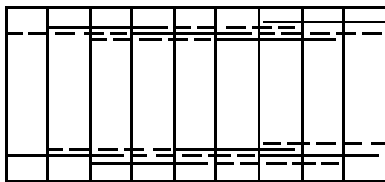


Figura 3. Esquema de clavado mostrando desfasaje de clavos

Existen distintos esquemas de clavado de las tablas, lo importante es que la unión resista las fuerzas de corte según el cálculo estructural. Para ahorrar tiempo y economizar el proceso de clavado se pueden colocar siempre 2 tablas a la vez, asegurando la penetración mínima de los clavos. Para aumentar la rigidez de la placa se pueden clavar las tablas en ángulo usando clavos especiales con un perfil, de esta forma los clavos son solicitados doblemente, a tracción y a corte.

Las tablas no necesariamente tienen que tener la longitud de la placa que conforman, sino que se pueden aplicar uniones de tope (“Butt Joints”). De esta manera se pueden usar tablas que de otra forma no tendrían aplicación estructural. Las uniones de tope hay que considerarlas en el cálculo estructural y eventualmente debe aplicarse un esquema de clavado más concentrado. Debe evitarse además una repetición de uniones de tope a la misma altura de la placa. La distancia entre 2 uniones de tope en 2 tablas seguidas debe ser como mínimo 1,20 m (Becker et al, 1997, citado por Tannert 2002).

## **2.3 Fabricación y montaje**

Los materiales fundamentales para la producción de NLT son: la madera (madera y madera contrachapada / OSB), los clavos y también las protecciones (impregnantes, lacas, etc.) para su puesta en obra.

### **2.3.1 Madera**

Los factores principales a considerar para determinar las especies y grados de madera a utilizar son disponibilidad, costo, desempeño estructural y estética. La clase y el grado estructural de la madera afectan tanto la resistencia como la apariencia del NLT. El color, la uniformidad de apariencia y la presencia de defectos visuales difieren entre especies. Además de consideraciones estéticas o estructurales, las especies también varían de otras maneras considerables, como en su capacidad para absorber y liberar agua a diferentes velocidades -aspecto que deberá ser tenido en cuenta fundamentalmente si el NLT estará expuesto a humedad significativa durante el proceso de construcción- y la trabajabilidad y dureza que están generalmente relacionadas con la densidad. Por ejemplo, el *Eucalyptus Grandis* es más denso que el *Pinus taeda*, por lo que el uso del primero puede resultar en una mayor resistencia y dificultad al clavar o cortar.

Cuando el NLT se deja visto como terminación interior, el grado de la madera usada también importa. Por ejemplo, podemos usar una madera de *Pinus elliottii* clasificada visualmente como EC1 que puede cumplir con los requisitos estructurales, pero no necesariamente con los visuales y de terminación. Utilizar madera de un grado de clasificación superior, que considere también los defectos visuales (aún no existentes en nuestro país), puede cumplir mejor con los criterios estéticos. De todos modos, su disponibilidad puede ser limitada y estos grados de madera, en general, suelen ser más caros. Por otra parte, las maderas de grados estructurales superiores también pueden mejorar la resistencia y rigidez de NLT.

### **2.3.2 Paneles empalmados y fingerjoints**

Los paneles se fabrican normalmente con tablas continuas cortadas a la longitud del panel. Cuando se necesiten paneles más largos deben empalmarse las tablas siguiendo determinado patrón o pueden usarse tablas de madera unidas con *fingerjoints*. Para el primer caso, a menudo llamados paneles



"empalmados", se pueden usar tablas de menor longitud, pero la complejidad y el costo de fabricación aumentan. La madera "finger" usada ampliamente para fabricar otros productos de madera masiva -como GLT y CLT- también se puede utilizar para NLT, fundamentalmente en casos donde las juntas a tope ("*Butt joints*") no sean deseables por razones estructurales o estéticas. Debe considerarse de todos modos que la madera fingerjoint cuesta habitualmente un 15% al 20% más que la entera. Además, otro factor importante a considerar que su uso puede incidir también en la cantidad de material requerido, ya que el grosor de la madera finger, generalmente, será menor que el de la madera de dimensión típica. En caso de utilizar este tipo de tablas, los requisitos estructurales para el tipo de unión finger deben ser evaluados y especificados por el ingeniero estructural, ya que no todas las juntas están diseñadas para usarse en situaciones de solicitaciones a flexión según. Si se utiliza madera fingerjoint, las uniones se deben escalonar de una hilera a la siguiente (NLT Design & construction guide, 2017).

### **2.3.3 Madera contrachapada / OSB**

Las placas estándar de madera contrachapada u OSB se utilizan generalmente sobre pisos o techos de NLT y en uno o ambos lados de las paredes de NLT. Ambas se usan para proporcionar rigidez vertical u horizontal y colaboran en la conexión los paneles prefabricados creando un plano continuo.

### **2.3.4 Clavos y conectores**

Los clavos a utilizar pueden ser de 2 tipos: acero común y acero galvanizado. Si los paneles quedan expuestos al agua o en ambientes húmedos (tanto en su vida de servicio como en su proceso de construcción) es conveniente utilizar galvanizados, tanto para unir las tablas entre sí como para unir las placas de OSB o contrachapado con los paneles y placas. Si se usaran los no galvanizados podrían aparecer manchas de hierro durante los períodos en que quede expuesto. Si se especifican clavos de más de 76 mm, debe considerarse que requerirán clavadoras neumáticas más costosas y potencialmente un compresor más grande. En general se utilizan clavos de 3,3 mm de diámetro, pero en algunos casos podrían necesitarse clavos de 3,7 mm. En tales casos es esperable que el costo sea mayor.

Los tornillos autorroscantes se utilizan a menudo para conectar NLT a sus soportes y pueden utilizarse para reforzar paneles en otras condiciones del conjunto como aberturas o voladizos. Cuando éstos sean necesarios, es recomendable que sean galvanizados, de modo de evitar manchas de hierro. Por otra parte, cabe considerar también que el galvanizado reduce la resistencia del acero.

En cuanto a su uso en la unión de las tablas que conforman cada panel, debe considerarse que aunque los tornillos autorroscantes tienen una capacidad estructural mucho mayor que los clavos, requiriendo menos cantidad por panel NLT, el uso de tornillos aumentará el tiempo de fabricación y por consiguiente los costos de mano de obra. Por ejemplo, solamente agregando un par de tornillos en el centro, en cada tabla, a una distancia de 305mm el tiempo de montaje se multiplica aproximadamente por tres. (NLT Design & construction guide, 2017).

### **2.3.5 Protecciones**

Los recubrimientos incluyen selladores y tintas que a menudo se aplican a las caras expuestas de pisos, techos y paredes de NLT, tanto para su protección como con fines estéticos. Se pueden aplicar tanto en fábrica como en obra. Si bien los recubrimientos pueden mitigar las manchas de agua, no previenen la hinchazón y no son un control efectivo de la humedad de la construcción. Las manchas de agua suelen ser mínimas para los paneles de NLT horizontales, incluso sin recubrimientos, ya que las uniones entre tablas laminaciones crean un borde de goteo natural.

Hay muchos tipos diferentes de recubrimientos. Los impregnantes suelen funcionar mejor que los de película, ya que el movimiento natural del panel de NLT con el tiempo, puede provocar su contracción, expansión o agrietamiento. Para paneles que queden expuestos al exterior deben considerarse y especificarse cuidadosamente las recomendaciones de revestimiento y requisitos de mantenimiento de acuerdo al uso y grado de exposición del panel.

## **2.4 Propiedades de elementos laminados clavados**

Las placas y paneles NLT, al igual que otros elementos constructivos similares, presentan un conjunto de propiedades físicas y mecánicas particulares que es importante conocer a la hora de considerarlos como elementos constitutivos de un proyecto arquitectónico. Al tratarse de elementos relativamente poco utilizados no existe abundante bibliografía al respecto y por tratarse de un nuevo elemento constituido por la unión mecánica de piezas de madera, su comportamiento no es directamente asimilable al de elementos conformados únicamente por madera maciza.

### **2.4.1 Propiedades físicas.**

Las más importantes a considerar son: las térmicas, acústicas, la resistencia al paso del viento, a la humedad y al fuego. Desde el punto de vista térmico, los paneles y placas de madera maciza, requieren porcentajes y espesores menores de aislante térmico que las construcciones de entramado ligero u otros sistemas constructivos en madera no maciza. Por ejemplo, un tabique basado en placas NLT requiere entre 20 a 40 mm menos de aislante térmico que uno de entramado ligero para obtener el mismo valor  $k$  de conductividad térmica. (Tannert 2002). Por otra parte, todos los investigadores coinciden en su recomendación de usar los valores de la madera aserrada para definir la conductividad térmica de un elemento laminado clavado (Gicklhorn y Stahl, 2001 citados por Tannert 2002). La estanqueidad al paso del viento, puede incidir fuertemente también en la capacidad aislante térmica del cerramiento. Al tratarse de placas compuestas por elementos independientes unidos por sus caras, puede considerarse que cada nuevo elemento presenta una infinidad de fisuras, cuyo ancho puede variar, según la época del año entre 0 mm y 0,3 mm. Por lo tanto, es importante considerar la colocación de una capa de fieltro exterior, con sus uniones selladas de modo de evitar el paso del viento. Asimismo, debe procurarse también la

aislación interior contra el paso de aire para disminuir pérdidas de energía y evitar que se produzca condensación intersticial, para lo que es recomendable colocar una barrera de vapor continua (Jung, 1999). Desde el punto de vista higroscópico y de aislación de la humedad, caben en general las mismas consideraciones que para cualquier tipo de construcción en madera en cuanto al contenido de humedad de los elementos de madera que conforman los paneles y placas, particularmente debido a que la variación dimensional por cambios en su contenido de humedad puede ser muy importante. Por lo tanto, debe asegurarse que las placas tengan un contenido de humedad (CH) cercano al de equilibrio de la futura vivienda. Las fisuras o separaciones entre tablas se producen debido a este cambio dimensional y su magnitud depende de 3 factores: el espesor de la tabla y el CH en el momento de la fabricación y en su uso. Gracias a la presencia de las uniones clavadas y su flexibilidad, los cambios dimensionales pueden ser mitigados y con ello sus consecuencias estéticas. (Tannert 2002). En cuanto al comportamiento ante el fuego, este tipo de elemento puede asimilarse al de una pieza de madera maciza, pero debe considerarse la presencia de fisuras que posibilitan el paso del humo a la cara opuesta (Jung 1999). Algunos autores recomiendan para el cálculo del espesor necesario según su destino final, aumentar la velocidad de combustión un 25% para considerar los efectos de las fisuras (Falkner, 1997). Todas las medidas de diseño consideradas en otros sistemas constructivos de madera son también aplicables a este, como la disposición de una carpeta de hormigón sobre las placas o colocación de capas interiores de láminas de yeso. Desde el punto de vista acústico, en comparación con otros sistemas constructivos de madera, los elementos NLT tienen una masa mayor y, por tanto, un mejor comportamiento aislante. A su vez, las múltiples separaciones entre tablas impiden garantizar la estanqueidad al paso de aire por lo que su capacidad aislante disminuye. Asimismo, estudios de laboratorio han demostrado que las uniones clavadas mejoran la aislación de los ruidos de impacto debido a la amortiguación en la propagación de la energía producida por la unión flexible (BECKER et al, 1997). Al igual que en otros sistemas de madera masiva, otro elemento importante a considerar para evitar la propagación de sonidos es la aislación de los puntos de unión entre los diferentes elementos, mediante la aplicación de bandas de reducción acústica. Por otra parte, en cuanto a la absorción de los ruidos aéreos para lograr una buena acústica en salas, este tipo de elementos permite, mediante diferentes diseños que alternen formas y alturas diferentes en las tablas, lograr superficies rugosas que absorban las ondas sonoras dentro de las cuales, además, pueden disponerse materiales que aumenten dicha capacidad. (ver Figura 5).

#### **2.4.2 Propiedades mecánicas.**

Las placas NLT están conformadas por láminas unidas por clavos conformando uniones flexibles. A través de este clavado transversal, la placa adquiere esencialmente la función estructural de repartir las cargas, de modo que algunas láminas que no reciben carga directa, colaboran también en la resistencia del elemento ante la aplicación de cargas. En un sistema así, una vez que se produce una falla, las tablas

más rígidas soportarán más carga que las más débiles, lo que resulta en una redistribución contributiva de cargas en el sistema. Esto crea un factor de reparto de cargas confiable, que ayuda a disminuir los impactos de algunos defectos propios de la madera que disminuyen su resistencia, como nudos, en el rendimiento general del producto. (Derikvand, et al. 2019). Existe, por tanto, un efecto de compensación de defectos por la colaboración de varias tablas trabajando a la vez, lo que le otorga a la placa un módulo de elasticidad (MOE) más elevado que el del promedio de las tablas que lo conforman (Ogunrinde 2019). Al presentar diferentes propiedades en sus dos direcciones (longitudinal y transversal) estas placas pueden analizarse como una placa ortotrópica, o puede utilizarse también la teoría de las vigas (Tannert 2002).

## 2.5 Aplicaciones de las placas NLT

Las placas laminadas clavadas pueden aplicarse en diversos tipos de proyectos arquitectónicos, tanto en paredes como en losas, así como en elementos especiales como escaleras y cajas de ascensor. A su vez, pueden utilizarse combinados con otros sistemas constructivos, siendo común verlos en la confección de entrepisos y techos. Con los elementos entablados pueden conformarse también encuentros en ángulos de diversa medida colocando en la arista una tabla especial. También es posible fabricar elementos curvos insertando cuñas o cepillando las tablas cuneiformes o superficies regladas de simple y doble curvatura desfasando cada una de las tablas con respecto a la anterior. (ver Figura 4)

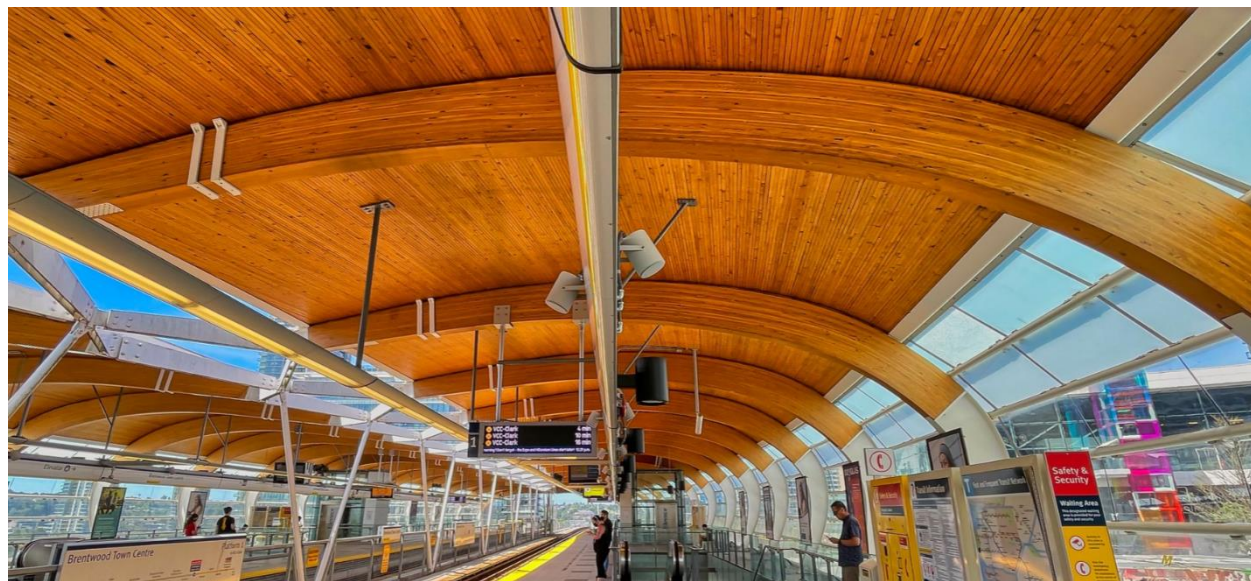


Figura 4. Placas curvas de NLT. Brentwood Station, Burnaby, BC. Canadá. (foto: Ted McGrath.Flickr-2021).

Las placas NLT admiten diferentes posibles terminaciones, ya sea dejándolas a la vista o revistiéndolas. El cepillado es necesario, tanto para recibir los revestimientos como por motivos estéticos. Es sí muy importante cepillar las caras de las láminas que conforman cada placa, de modo de mejorar el contacto entre ellas. En casos donde las exigencias estéticas y proyectuales no sean altas, las tablas pueden usarse sin cepillado previo. Esto último disminuye el desperdicio de madera. Según las exigencias estructurales, ópticas y acústicas se pueden elaborar placas de madera con perfiles de las más variadas formas (Tannert 2002).

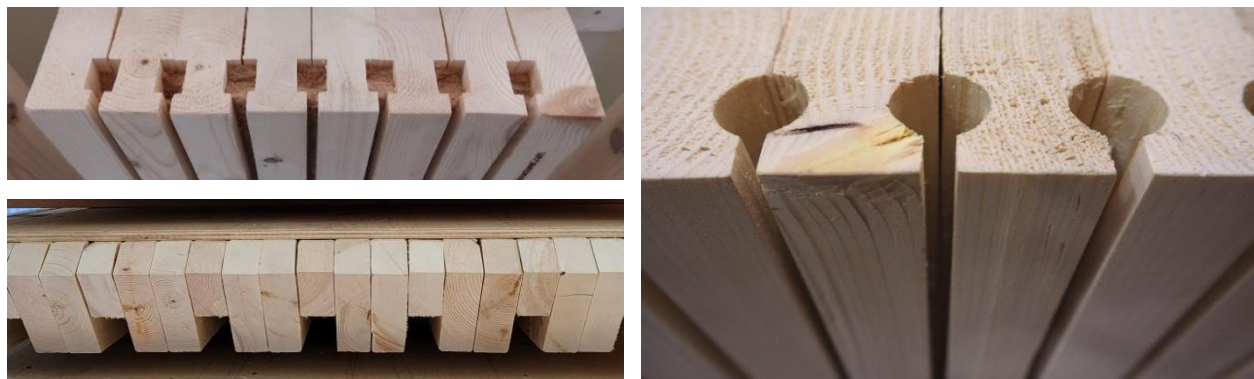


Figura 5. Algunos ejemplos de terminaciones de placas NLT.

## 2.6 Revisión bibliográfica

Hasta fines del siglo XX los trabajos de investigación que estudian el comportamiento mecánico de las placas NLT focalizan en su empleo para la construcción de puentes y en algunos escasos ejemplos para edificaciones. Pueden mencionarse como referencia los trabajos desarrollados por Natterer y Sandoz en Suiza (1996) en los que estudia el uso de tablas de bajo costo unidas por clavos o tarugos de madera para conformar paneles que adquieran nuevas prestaciones estructurales. Jung (1999) presenta paneles conformados por tablas unidas por tarugos de madera que conforman elementos de gran escala. Haller y Pannke (1998) estudiaron el comportamiento estructural y físico de elementos de NLT encontrando que las juntas a tope dispuestas regularmente reducían la rigidez a la flexión en aproximadamente un 20%, mientras que si las mismas eran distribuidas de forma aleatoria o irregular presentaban un mejor comportamiento. Dávalos et al. (1993) estudiaron el comportamiento a la flexión de decks de madera laminada conformados con piezas unidas a tope, encontrando que si estas siguen patrones regulares se les puede aplicar en el cálculo de su rigidez a la flexión un factor de reducción confiable.

En nuestra región pueden citarse las investigaciones realizadas por Tannert (2002) en Chile que estudió los elementos laminados clavados constituidos por tablas de Pino radiata para la construcción de

viviendas constituidas por paneles prefabricados de dimensiones reducidas que permitieran una fácil transportabilidad y montaje sin la necesidad de utilizar maquinaria pesada.

En los últimos años varios trabajos se han dedicado a estudiar el comportamiento mecánico de paneles conformados por tablas unidas mecánicamente por clavos o tarugos. Entre ellos pueden citarse los realizados por Bocquet (2007) que estudia paneles de madera laminada con dos tipos de medios de fijación; clavos de 88.9mm y tarugos de haya de 100mm y concluye que las propiedades de resistencia y rigidez de los paneles NLT y DLT dependen principalmente del tipo, diámetro, largo y separación del elemento de fijación y de la especie de madera utilizada. Por otra parte, Alan and Ansell (2012) estudiaron el efecto de diferentes separaciones entre elementos de fijación en paneles NLT y concluyeron que patrones de clavado de mayor separación y menor cantidad de clavos evitan la propagación entre clavos de fallas por tracción de la madera ante esfuerzos de preso-flexión, mientras que la reducción de la separación, a partir de cierto umbral, y el aumento del número de clavos tienen el efecto contrario, ya que las perforaciones producidas por los clavos actúan como un defecto inducido en la madera.

Holstein (2011), citado en Ogunrinde (2019), tras estudiar los paneles conformados por tablas unidas por diferentes tipos de clavijas afirma que los principales problemas a controlar ante sollicitaciones de preso-flexión son las excesivas deformaciones y las posibles delaminaciones entre elementos y que el elemento estructural de NLT se comporta como una unidad sólo si se establece una interconexión adecuada y correcta de los componentes. En ese sentido Ogunrinde (2019) en sus ensayos en paneles conformados por láminas clavadas de diferentes largos concluye que la unión mediante los clavos convierte “una matriz frágil” en “un material dúctil” ya que la unión actúa como un atenuador de fallas producidas por la tracción que soporta cada una de las tablas, que a su vez permite que éstas tengan capacidad de reserva después de producida la primera fisura en sus fibras.

Por otra parte Ogunrinde (2019) y Ma (2019) estudiaron la incidencia de juntas por uniones de láminas a tope en la resistencia y rigidez de paneles conformados en su totalidad por láminas discontinuas o intercaladas con láminas enteras. Diferentes formas de combinarlas producen variados resultados, pero en todos los casos afirman que la utilización de madera con baja cantidad de defectos y el refuerzo de las uniones mediante la aplicación de clavos complementarios, aumenta significativamente la resistencia del panel. Ma (2019) basado en los estudios de Williams (1994) muestra que el aumento de la distancia entre juntas a tope en láminas adyacentes o cercanas favorece la resistencia del panel, debido al mecanismo de transferencia de las cargas. Paneles de NLT con un espaciado menor entre juntas a tope en láminas adyacentes tuvieron que transferir carga a una distancia menor (es decir, con menos clavos), y, en consecuencia, al aumentar las fuerzas a soportar por los clavos, estos alcanzan su capacidad límite antes de que se alcancen las tensiones definitivas de flexión de la madera (Williams et al., 1994). Por otra parte, Haller y Panke (1998) en los estudios mencionados anteriormente concluyeron que una distribución

regular de las uniones a tope dentro de un panel reduce aproximadamente 20% la resistencia a la flexión, mientras que distribuciones irregulares tienen menor incidencia.

En cuanto al desarrollo normativo, en Norteamérica los códigos de construcción de Estados Unidos (2015 International Building Code, ANSI/AWC NDS-2015 National Design Specification (NDS) for Wood Construction) y Canadá (CSA O86 "Engineering design in wood" (CSA 2014a) and CSA S6 "Canadian Highway) bridge design code" (CSA 2014b), incluyen especificaciones técnicas y requisitos de fabricación de NLT, basadas en intensivas campañas experimentales. Entre los requisitos destacan: dependiendo del espesor de la lámina longitud, diámetro y tipo de clavo, patrón de clavado, distancias de los clavos a los bordes, espaciamiento entre clavos, distribución y separación de las juntas a tope en láminas discontinuas. Estas especificaciones están recopiladas en una publicación común a los dos países "Nail Laminated Timber, Canadian (or US) Design and Construction Guide". En estas guías se encuentran otras recomendaciones constructivas, tales como soluciones de apoyo y orientación de paneles con el fin de "garantizar un uso seguro, predecible y económico del NLT".

En Europa y Sudamérica no existe normativa específica para el diseño y construcción de paneles y placas NLT.

### 3 Comportamiento mecánico de uniones de madera de pino uruguayo con clavos de pequeño diámetro

#### Resumen

Las uniones mecánicas entre elementos de madera cumplen un rol preponderante en comportamiento estructural de la madera laminada clavada. Las placas de madera laminada clavada (NLT) consisten básicamente en la unión mecánica de un conjunto de tablas para conformar un elemento estructural sólido. Éstas colocan cara a cara y las uniones se realizan a través de clavos metálicos. Su comportamiento estructural depende principalmente de esta unión mecánica. El objetivo de este trabajo fue estudiar el comportamiento mecánico de uniones de madera aserrada de *Pinus elliottii* proveniente de plantaciones de rápido crecimiento en Uruguay. Las uniones fueron realizadas con clavos espiralados de 3,1 mm de diámetro y 100 mm de longitud colocados con clavadora neumática y siguiendo los lineamientos establecidos en el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1- 2016). El programa experimental focalizó en ensayos de cuerpos de prueba cargados en dirección paralela y perpendicular a las fibras. Se construyeron tres series de cuerpos de prueba: PA35, conformadas por 3 piezas de madera de 145mm x 35mm x 300mm clavadas entre sí con sus caras colocadas en sentido paralelo a las fibras; PA50, similar a la anterior pero conformada por tablas de 145mm x 50mm x 300mm; PP35, conformadas por 2 piezas horizontales de 145mm x 35mm x 450mm en medio de las cuales se colocó de manera perpendicular a éstas otra de 145mm x 35mm x 300mm. Adicionalmente, se construyeron 2 series más para estudiar el efecto del rozamiento entre tablas cuando estas conforman una placa tipo de NLT: P9S, conformadas por 9 piezas de madera de 145mm x 35mm x 350mm clavadas entre sí con sus caras colocadas en sentido paralelo a las fibras y P9C, igual a la anterior pero con un film de polietileno entre cada una de las piezas. Todas ellas fueron sometidas a ensayos de resistencia y deslizamiento de acuerdo a lo estipulado en la norma UNE EN 26891 (1991) para determinar la capacidad portante de la probeta y de los clavos y el módulo de deslizamiento instantáneo ( $K_s$ ). También se evaluaron los modos de falla y la deformación de los clavos sometidos a simple y doble plano de corte según la teoría de Johansen (1991). Los resultados muestran que las uniones clavadas en las que cada elemento de unión atraviesa 3 piezas presentan valores cercanos al doble de resistencia que las que atraviesan 2, que la dirección de las fibras incide de manera importante en el módulo de deslizamiento ( $K_s$ ) y que el rozamiento entre las láminas tiene incidencia en la resistencia de los cuerpos de prueba.

Palabras clave: Uniones clavadas, madera laminada clavada, NLT, *Pinus elliottii*, Módulo de deslizamiento, Teoría de Johansen.



### 3.1 Introducción

Uruguay se encuentra en un momento óptimo para desarrollar sistemas constructivos en madera que permitan agregar valor en la cadena productiva forestal-maderera, en particular placas de madera laminada clavada (NLT) para su empleo en entresijos, techos y paredes de edificaciones residenciales. Los elementos laminados clavados de madera (NLT por su sigla en inglés) consisten básicamente en la unión mecánica de un conjunto de tablas para conformar un elemento estructural sólido. Las placas se colocan cara a cara y las uniones se realizan a través de clavos metálicos. El uso de clavadoras neumáticas facilita y economiza su ejecución, ahorrando tiempos y permitiendo su ensamblaje mediante el uso de mano de obra no calificada.

Este trabajo está enmarcado en un proyecto integral que aborda el estudio del comportamiento a la flexión de placas NLT construidas con *Pino elliottii* uruguayo y clavos metálicos, para su empleo en entresijos de edificaciones residenciales. El comportamiento mecánico de las uniones madera-clavo fue estudiado por Piter (2014), aplicando las especificaciones establecidas en las normas europeas UNE EN 1380 (2009) y UNE EN 26891 (1991). El autor reportó resultados con altas capacidades de carga para de este tipo de uniones y modos de falla dúctiles que permiten importantes deslizamientos entre las tablas sin llegar a roturas frágiles de la madera, aspecto congruente con los actuales criterios de seguridad estructural. Esta ductilidad es otorgada por la elevada esbeltez e los clavos y la forma en que éstos se deforman, conformando rótulas plásticas. El comportamiento dúctil es preferido frente al frágil porque permite el desarrollo de articulaciones plásticas que facilitan la redistribución de los esfuerzos dentro de los elementos de la conexión, incrementando su capacidad portante y maximizando la disipación de energía (Piter 2014).

Hasta comienzos de siglo, los trabajos de investigación sobre el comportamiento mecánico de paneles NLT y sus uniones, eran escasos.

En nuestra región pueden citarse las investigaciones realizadas por Tannert (2002) en Chile que estudió los elementos laminados clavados constituidos por tablas de Pino Radiata -la especie más expandida en ese país-. Parte de su trabajo lo dedica al estudio de las uniones clavadas y su comportamiento mecánico, ensayando distintas distribuciones y ángulos para la colocación de los clavos, arribando a diferentes conclusiones al respecto, como la comprobación de la incidencia del rozamiento en la resistencia de las placas.

Luego, Bocquet (2007) realiza estudios sobre 2 tipos de uniones; clavos de 3.1 mm de diámetro y 88.9mm de longitud y tarugos de haya de 10mm de diámetro y 80mm de longitud, y concluye que las propiedades de resistencia y rigidez de los paneles NLT y DLT dependen principalmente del tipo, diámetro, largo y separación del elemento de fijación y de la especie de la madera de las láminas utilizada.

Sosa Zito (2015) en sus estudios acerca del comportamiento de las uniones múltiples, analizando en particular el modo de rotura y la capacidad portante de estas uniones conformadas por clavos de pequeño diámetro, que las mismas presentan un comportamiento dúctil ante la aplicación de cargas. En cuanto al deslizamiento de las conexiones, sus estudios mostraron una significativa diferencia entre los valores del módulo de deslizamiento ( $K_s$ ) determinados en dirección paralela y perpendicular a las fibras para todos los tipos de conexiones simples investigadas

Por otra parte, Zhu (2018) desarrolló y propuso diseños que aumentan la capacidad portante de los medios de unión, analizando tipos, tamaños y distribución de los elementos de unión tipo clavija, concluyendo, entre otras cosas que los modos de falla de estos elementos pueden ser predichos correctamente a través de la aplicación de la teoría de Johansen (1949).

El modelo desarrollado por Johansen (1949), y respaldado por resultados de intensivas campañas experimentales, es comúnmente empleado para interpretar y predecir la resistencia de una conexión entre maderas mediante clavijas. Según Johansen, la capacidad de carga depende de la geometría de la conexión, la resistencia a la flexión del elemento de unión y la resistencia al aplastamiento de la madera. Vale señalar que el modelo es apropiado para conexiones múltiples que presenten fallas dúctiles y donde la carga máxima es directamente proporcional al número de elementos de unión (Zhu 2018). Por tanto, para alcanzar los modos de rotura previstos es necesario evitar una falla prematura en la madera, con características de rotura frágil, que puede producirse por esfuerzos cortantes o de tracción cuando el espaciamiento entre los elementos de fijación -o entre éstos y los extremos de los miembros unidos- es reducido (Sosa Zito 2015). La Figura 6 exhibe los modos de rotura considerados en este modelo para conexiones con doble cizalle. Modo 1 (a, b, c, g y h), sin ninguna deformación plástica (clavija rígida); modo 2 (d, e), con una única deformación plástica (con una clavija de baja rigidez doblada en la pieza central de madera) y 3 (f, j, k), con deformaciones plásticas que suceden tanto en el elemento central como en los laterales.

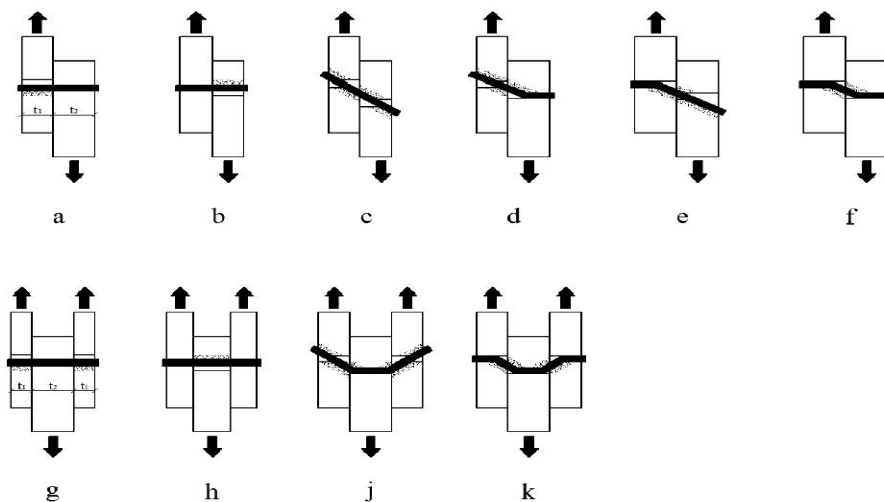


Figura 6. Modos de falla posibles en conexiones con simple y doble cizalle según Johansen (1949).

Tipo	Modo <sup>(1)</sup>	Expresión
Una sección de corte	a	$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} t_1 d$
	b	$F_{v,Rk} = f_{h,2,k} t_2 d$
	c	$F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right]$
	d	$F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[ \sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right]$
	e	$F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right]$
	f	$F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d}$
Dos secciones de corte	g	$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} t_1 d$
	h	$F_{v,Rk} = 0,5 f_{h,2,k} t_2 d$
	j	$F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[ \sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right]$
	k	$F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d}$

Figura 7. Capacidad portante para cada modo de rotura según Johansen

El objetivo de este trabajo fue determinar la rigidez y la resistencia de uniones de madera aserrada de *Pinus elliottii* proveniente de plantaciones de rápido crecimiento en Uruguay, materializadas mediante clavos de 3,1 mm de diámetro y 100 mm de longitud. Los resultados de este trabajo proveen información para estudios posteriores de placas NLT de tamaño estructural.

### 3.2 Materiales y métodos

La capacidad portante y la rigidez de las uniones (a través del cálculo del módulo de deslizamiento) se determinaron de acuerdo a UNE EN 1380 (2009), transmitiendo carga paralela y perpendicular a las fibras. La carga se aplicó de acuerdo al procedimiento establecido en UNE EN 26891 (1991).

### 3.2.1 Preparación de los cuerpos de prueba

La madera utilizada en este trabajo provino de una plantación comercial de *Pinus elliottii* de 27 años, ubicada en el norte de Uruguay. De una muestra compuesta por más de 250 tablas de madera aserrada (150 mm x 50 mm x 3000 mm) y secada en horno convencional, se seleccionaron en forma aleatoria 22 unidades, 18 de las cuales fueron cepilladas en sus caras hasta alcanzar 35 mm de espesor. Luego, las tablas fueron embaladas en film de polietileno y trasladadas al Departamento de Materiales y Productos Forestales del LATU para su posterior procesamiento y análisis. Para cada una de ellas se determinó el CH con xilohigrómetro de púa de resistencia eléctrica con una precisión de  $\pm 2\%$  y la densidad, computando el cociente entre el volumen (estimado con calibre marca Mitutoyo) y la masa (registrada con de precisión Mettler Toledo PG503-S). Los valores promedio de CH y densidad encontrados fueron 12,1 %, 412 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Posteriormente, fueron clasificadas visualmente de acuerdo a UNIT 1261 (UNIT 2018). El resultado fue diverso, observándose porcentajes similares de vigas de calidad visual EC1 y EC0.

Luego, las tablas fueron cortadas transversalmente en trozos de 300 y 450 mm de longitud para preparar dos series de cuerpos de prueba destinadas a determinar el comportamiento mecánico de las conexiones múltiples. La selección de las tablas y su marcado se realizaron siguiendo un criterio aleatorio, evitando zonas libres de defectos para ensayos de corte paralelo (serie PA35, n=11) y perpendicular a la fibra (serie PT35, n=10). Las probetas compuestas por tres trozos de tablas de 35 mm de espesor, fueron unidas mediante clavos de acero espiralado de 3,1 mm de diámetro y 100 mm de longitud, colocados con clavadora neumática (marca Apach). La Figura 8 muestra la clavadora y el tipo de clavo utilizados. La longitud de estos clavos fue suficiente para penetrar prácticamente el espesor total de las tres tablas de las probetas y generar dos planos de corte.

Por otra parte, se preparó una serie adicional para ensayos de corte con la carga aplicada en la dirección paralela a las fibras (serie PA50, n=10). Los cuerpos de prueba conformados por tres trozos de tablas de 50 mm de espesor c/u, emplearon el mismo tipo de clavo descrito en el párrafo anterior. En esta serie, la longitud de los clavos fue suficiente para penetrar solamente el espesor total de dos de las tres tablas de las probetas, y generar un solo plano de corte.



Figura 8. Clavadora neumática v clavos espiralados.

3.2.1.1 Conexiones preparadas para ser ensayadas bajo carga transmitida en dirección paralela a las fibras

La configuración de los cuerpos de prueba y la disposición de los clavos se muestran en la Figura 9 y Figura 10. Como puede apreciarse sobre cada tabla lateral se colocó la mitad de los elementos de unión, de modo de evitar la superposición de dos clavos y no duplicar la aplicación de clavos en cada punto.

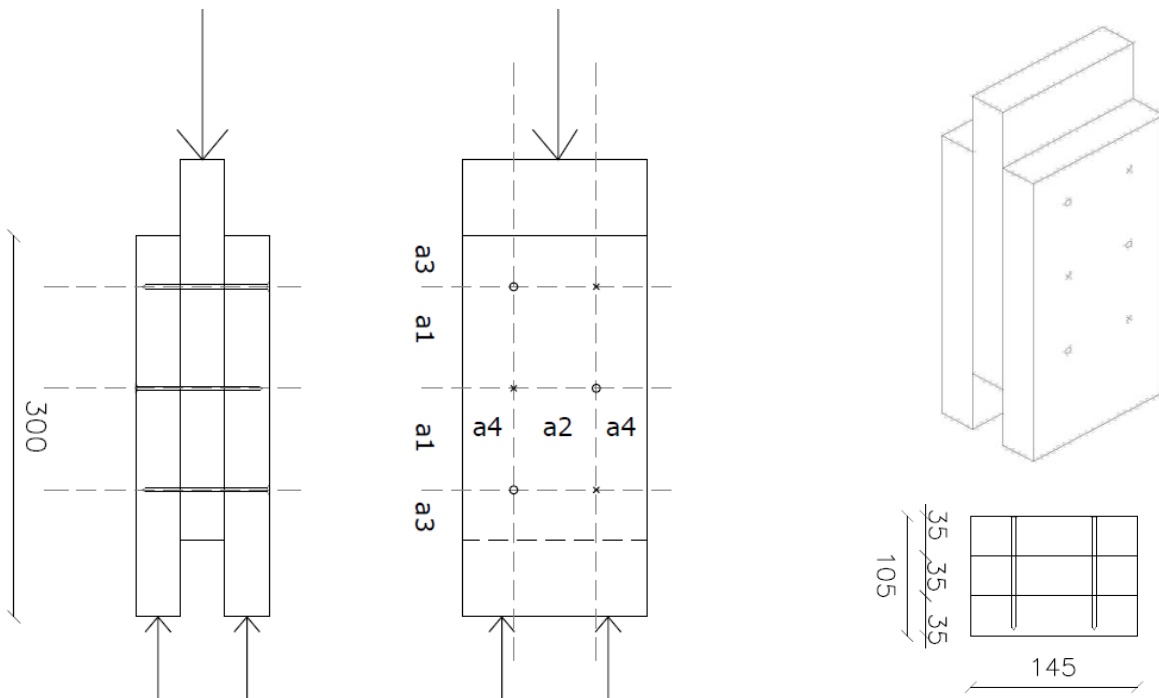


Figura 9. Conexiones clavadas preparadas para transmitir carga paralela a las fibras. Tablas de 35mm.  $a_1=80$ ;  $a_2=65$ ;  $a_3=40$ ;  $a_4=40$ . (Dimensiones en mm).

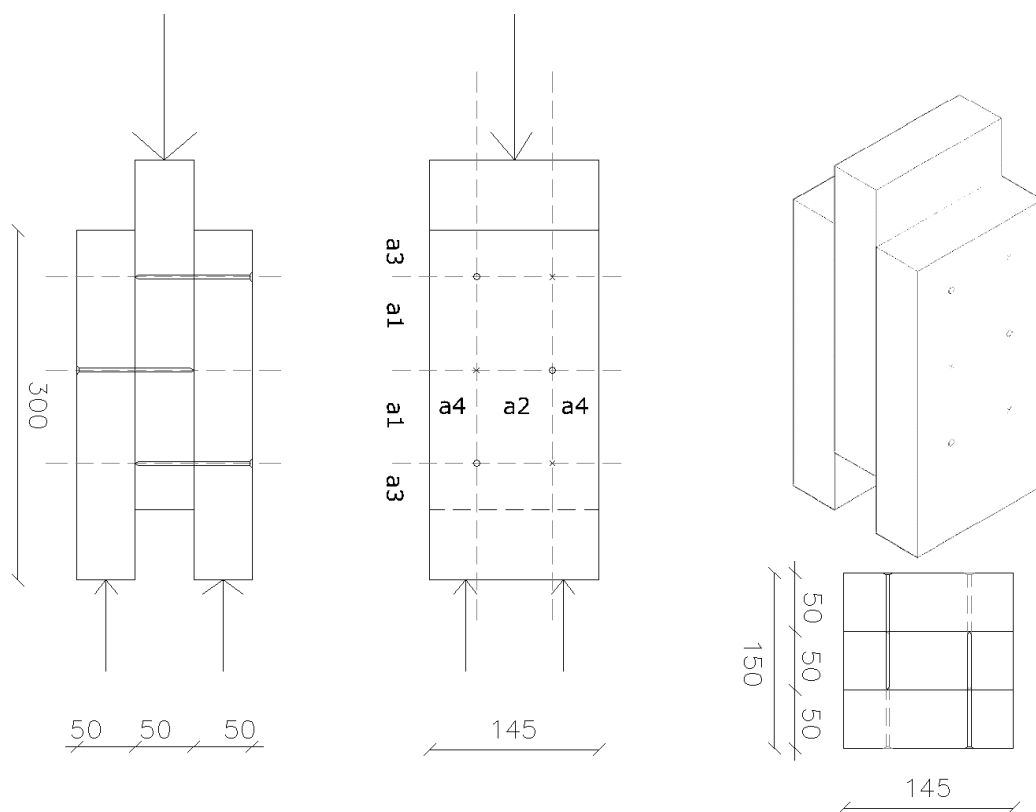


Figura 10. Conexiones clavadas preparadas para transmitir carga paralela a las fibras. Tablas de 50mm.  $a_1=80$ ;  $a_2=65$ ;  $a_3=40$ ;  $a_4=40$ . (Dimensiones en mm).

### 3.2.1.2 Conexiones preparadas para ser ensayadas bajo carga transmitida en dirección perpendicular a las fibras.

La conformación de estas probetas responde al propósito de conocer la influencia de la distancia al borde cargado en dirección perpendicular a las fibras ( $a_4$ ). Para ello, los cuerpos de prueba se construyeron respetando la distancia mínima recomendada por las normas europeas ( $a_4 = 7d$ ).

La forma del clavado fue la misma, la mitad del número de clavos se colocaron de cada lado, de modo de evitar que 2 clavos se superpongan y no duplicar la aplicación de clavos en cada punto.

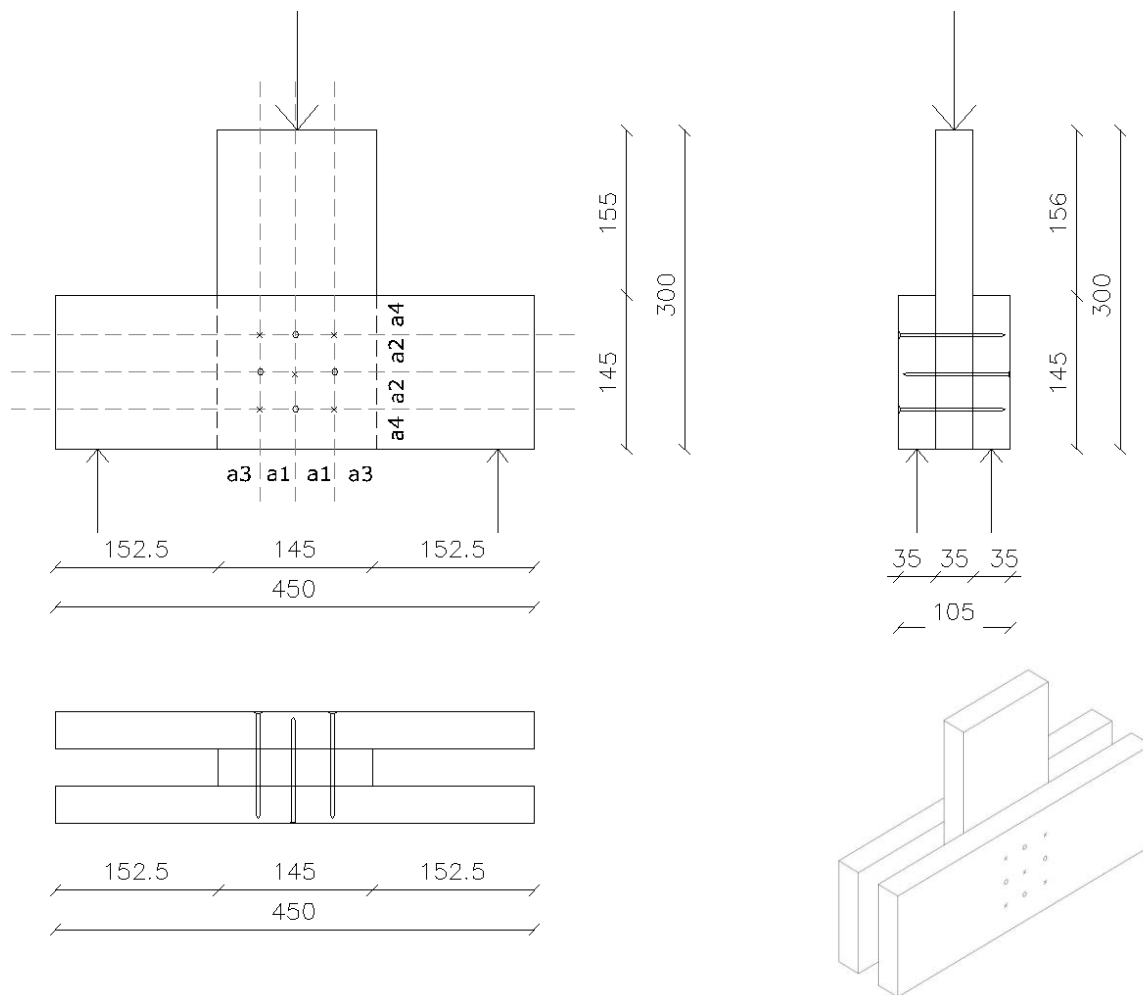


Figura 11. Conexiones clavadas preparadas para transmitir carga perpendicular a las fibras.  $a_1=35$ ;  $a_2=35$ ;  $a_3=38$ ;  $a_4=38$ . (Dimensiones en mm).

### 3.2.1.3 Probetas de ensayo de 9 tablas en dirección paralela a las fibras.

Se llevaron a cabo 2 grupos de ensayos realizados con probetas conformadas por 9 tablas, representativas de un trozo de placa NLT de tamaño real, de modo de determinar la resistencia y la rigidez de los elementos laminados clavados cuando actúan bajo fuerzas de corte, utilizando el concepto de módulo de corrimiento. Particularmente se estudió la influencia de la fricción entre las lamelas.

Para la realización de los ensayos se construyeron 2 series de 4 cuerpos de prueba cada una conformadas por nueve tablas clavadas entre sí de acuerdo al patrón de clavado a utilizar en la confección de los paneles de tamaño real, tal como se exhibe en la Figura 12. Las tablas usadas fueron de dimensiones nominales iguales a 35 mm x 145 mm de sección transversal y 350 mm de longitud.

En este tipo de configuración del ensayo es imposible evitar la aparición de esfuerzos diagonales entre las fuerzas de acción y reacción que provoquen fricción entre las tablas. Por ese motivo se preparó la segunda serie con láminas de polietileno intercaladas entre las tablas, de modo de intentar reducir este efecto y evaluar si el mismo es o no significativo.

La carga se aplicó sobre la lámina central y los apoyos sobre la segunda y penúltima. Las láminas laterales se colocaron para garantizar el mismo número de clavos en cada plano de corte, obteniéndose 3 planos de corte a cada lado de la central solicitados por una fuerza de reacción constante igual a  $F/2$ .

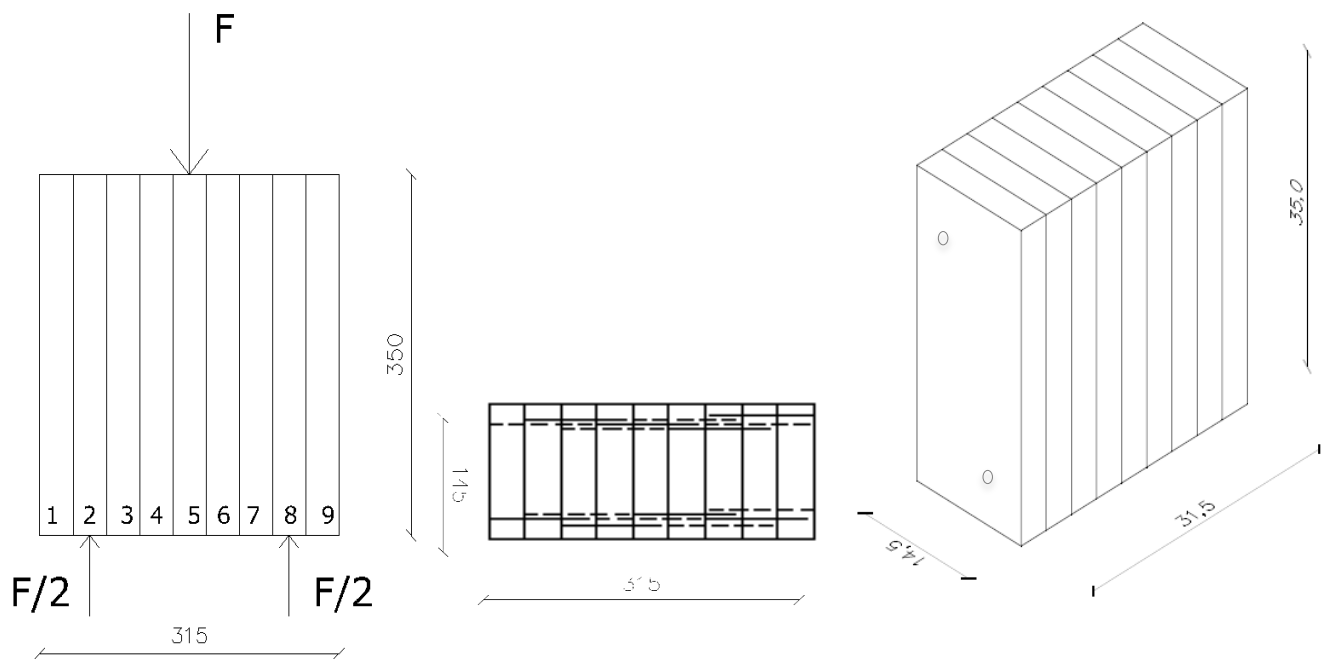


Figura 12. Conexiones clavadas preparadas para transmitir carga paralela a las fibras. 9 láminas de 35mm.

### 3.2.2 Ejecución de ensayos y determinación de propiedades.

Los ensayos de las conexiones múltiples se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en Montevideo. Para los mismos se utilizó una máquina de ensayos universales marca Controls con capacidad para desplazar el cabezal para la aplicación de las fuerzas a velocidad constante y de realizar mediciones de desplazamiento con intervalos de 1 segundo. En la Figura 13 y la Figura 14 se puede apreciar el equipamiento empleado.



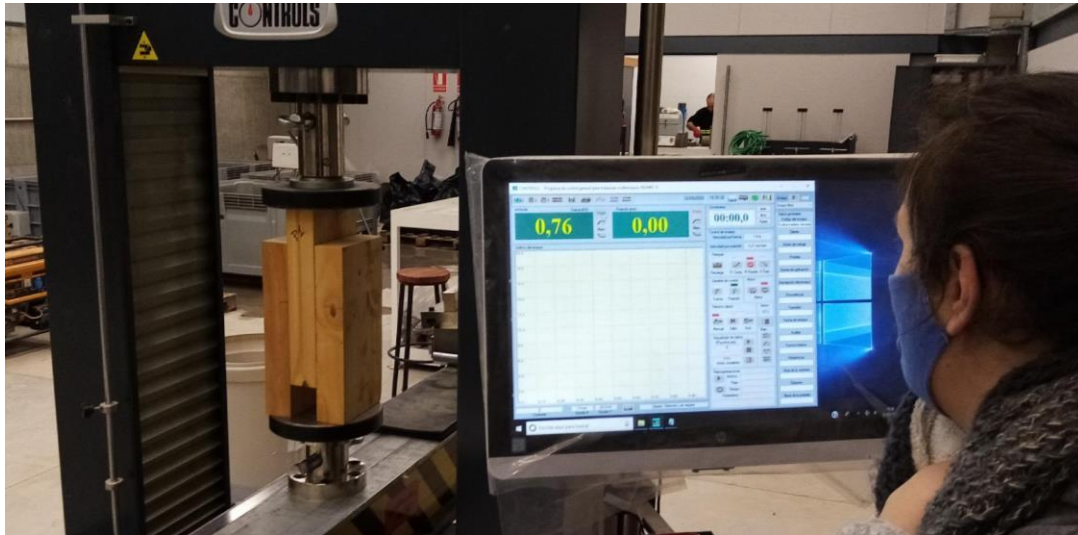


Figura 13. Equipamiento para ensayos de Fing, Udelar

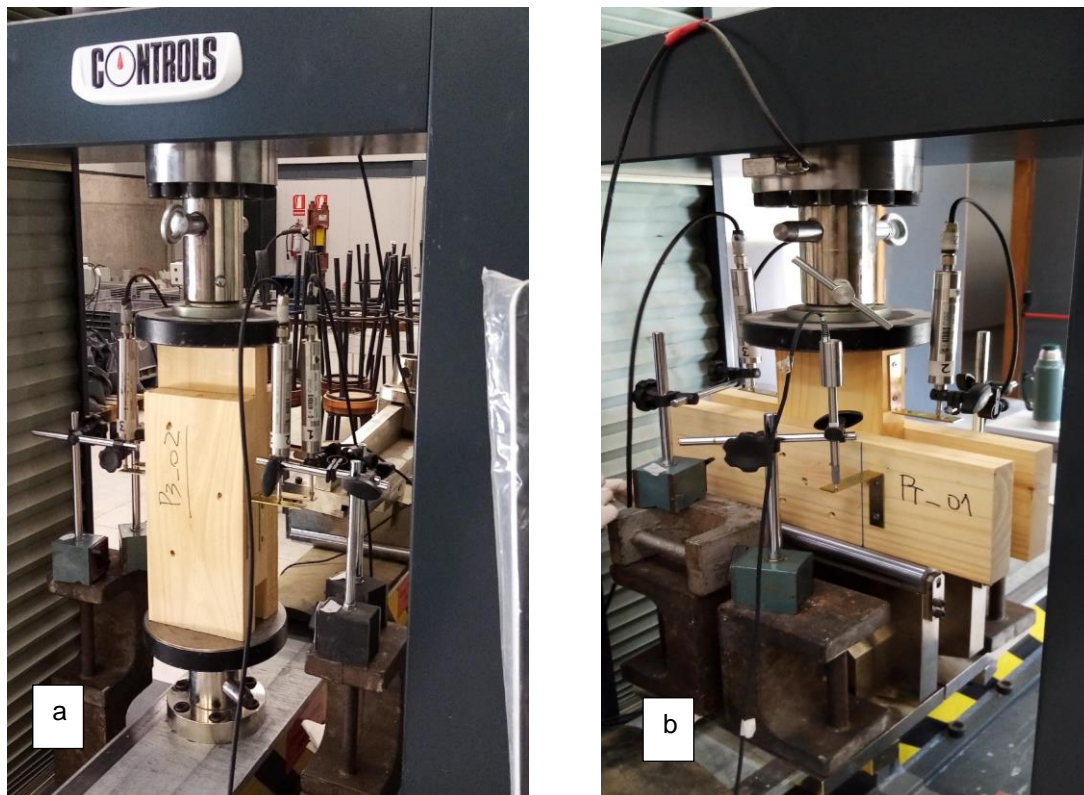


Figura 14. Ensayos de corte. Aplicación de carga de compresión en dirección a) paralela a la fibra, y b) perpendicular a la fibra

La aplicación de la carga de compresión en las conexiones preparadas para ser cargadas en la dirección de las fibras se efectuó directamente sobre la pieza central de la probeta a través del plato superior de compresión de la máquina, tal como lo ilustra la Figura 14 a). Asimismo, los cuerpos de prueba preparados para transmitir carga perpendicular a las fibras fueron sometidos a una carga de compresión sobre el miembro vertical como se ilustra en la Figura 14 b).

La aplicación de la carga de compresión en las conexiones de las probetas de 9 tablas preparadas para ser cargadas en la dirección de las fibras se efectuó colocando un dispositivo de apoyo cilíndrico que oficiara de nexo entre la lamela central y el plato superior de compresión de la máquina.

Para la ejecución de los ensayos se siguieron los lineamientos de la norma europea UNE EN 26891 (1991). El registro de la carga y el deslizamiento se efectuó con una precisión del 1% del valor de la carga máxima y a 2 mm de deslizamiento. Para valores menores a éstos la precisión se mantuvo en 0,02 mm.

Se realizaron tres pruebas preliminares para cada serie de probetas con el fin de determinar la carga máxima estimada ( $F_{max,est}$ ). La carga se aplicó siguiendo la relación carga-tiempo dispuesta en la norma

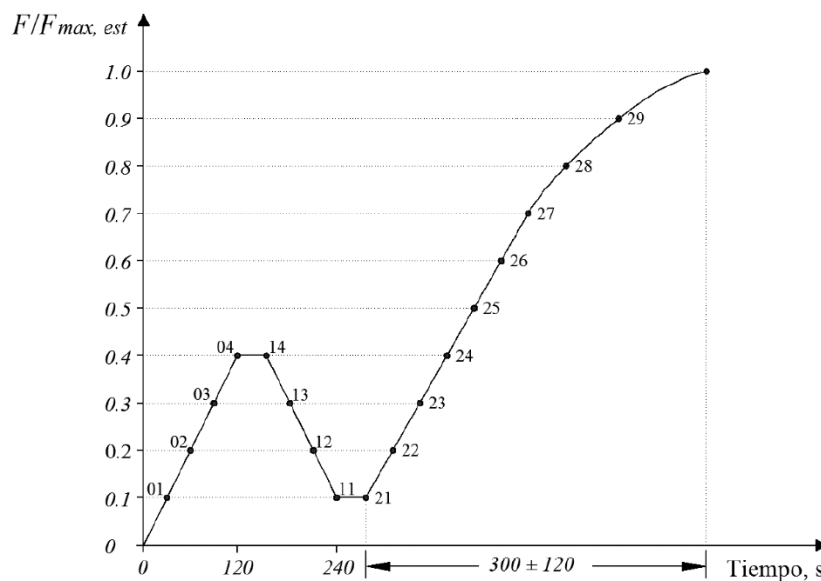


Figura 15. Ciclo de carga para ensayos de conexiones múltiples, según norma EN26891.

Para cada cuerpo de prueba se registraron los valores de carga-deformación, carga máxima alcanzada y tiempo de duración de ensayo.

El módulo de deslizamiento ( $K_s$ ) y la carga máxima para cada probeta, fueron determinados mediante la ecuación (1):

$$k_s = \frac{0,4F_{est}}{v_{i,mod}} \quad (N / mm) \quad \text{Ecuación (1)}$$

siendo:

$F_{est}$ : carga máxima estimada (N)

$$v_{i,mod} = \frac{4}{3}(v_{04} - v_{01}) \quad (mm)$$

$v_{04}$ : deslizamiento correspondiente al 40% de la carga máxima estimada (mm)

$v_{01}$ : deslizamiento correspondiente al 10% de la carga máxima estimada (mm)

Inmediatamente finalizado el ensayo de cada probeta se extrajo un trozo libre de roturas para determinar densidad ( $\rho$ ) y contenido de humedad (CH), de acuerdo a las normas ISO 3131 (1975) e ISO 3130 (1975) respectivamente. Para determinar de la masa del trozo se utilizó una balanza electrónica Mettler Toledo PG503-S, con capacidad de registrar 0,01 g. y para sus dimensiones se empleó un calibre Mitutoyo capaz de registrar 0,01 mm. Los valores de densidad fueron corregidos al CH de referencia de 12%, de acuerdo a EN 384 (2010), (aumentando 0,5% por cada 1% de diferencia con el CH de referencia y viceversa)

### Ensayos de clavos

Los clavos utilizados para el armado de las probetas y las placas fueron ensayados con el fin de determinar el momento de plastificación, valor relevante para conocer la capacidad portante de las conexiones que rompen dúctilmente con la formación de rótulas plásticas conforme al modelo original de Johansen. Este valor característico de los elementos de fijación, ( $M_y$ ,  $R_k$ ) es de suma importancia a la hora de calcular la capacidad portante de uniones múltiples con elementos de fijación de tipo clavija. En las conexiones en la que los clavos están sometidos a doble cizalle, este esfuerzo se pone de manifiesto en los modos de rotura j y k descritos en la Introducción de este capítulo.

Debido a que se desconoce este valor para los clavos empleados en esta investigación y que las reglas de EE. UU. (NDS 2012) consideran que el valor del momento de plastificación se incrementa con la disminución del diámetro del clavo, se ensayaron 49 clavos espiralados de 3,1 mm de diámetro de acuerdo a la norma ASTM-F1575 (2013). Los ensayos fueron realizados en el Dpto. de Procesos Industriales del Centro Universitario en Tacuarembó.

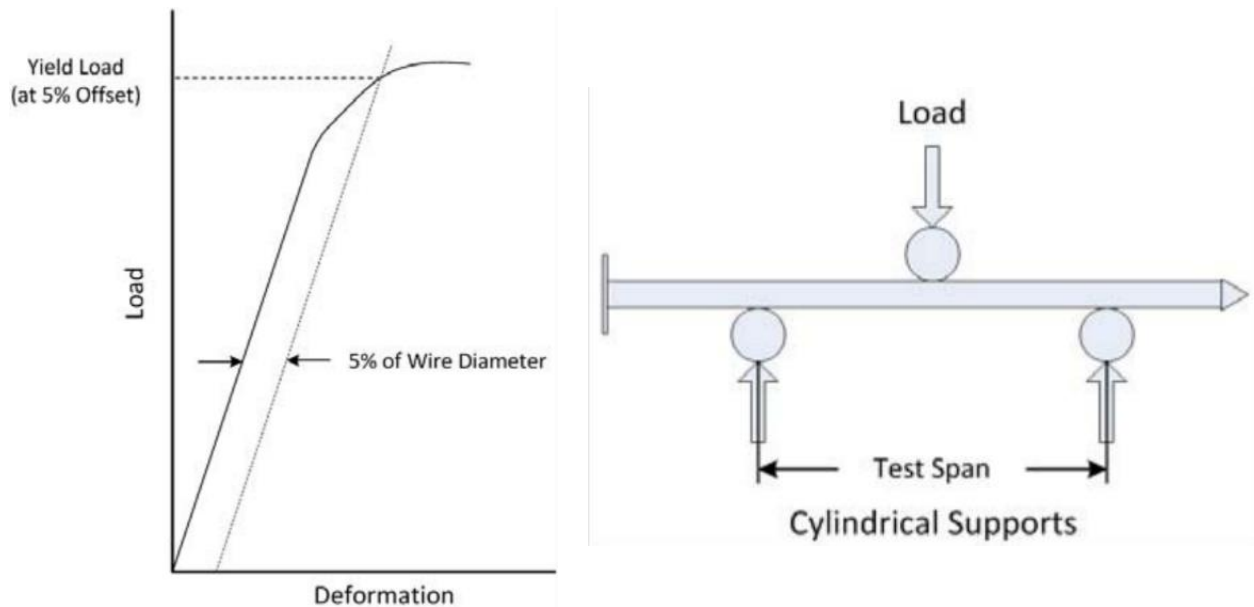


Figura 16 Configuración de ensayo de flexión en tres puntos y curva típica de carga-deformación de acuerdo a ASTM F 1575

### 3.2.1 Procesamiento de datos y análisis estadísticos

Los resultados de los ensayos experimentales fueron sujetos a análisis de varianza (ANOVA) para rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias en las series.

## 3.3 Presentación y discusión de los resultados

Luego de haberse obtenido los valores característicos de la densidad ( $\rho_k$ ) de las muestras analizadas de acuerdo a lo dispuesto en la norma europea EN 384 (2010), que en todos los casos fue inferior a 420kg/m<sup>3</sup>, se confirma que los valores de separación definidos fueron correctos. (se utilizaron los correspondientes a maderas con  $\rho_k \leq 420$  kg/m<sup>3</sup>: espaciamiento mínimo a adoptar entre clavos en la dirección de las fibras ( $a_1$ ) debe ser de 10 diámetros (10d) y la distancia mínima a los extremos cargados ( $a_3$ ), 15 d).

Asimismo, se descarta una posible influencia producto de un contenido de humedad desigual en los cuerpos de prueba, ya que el valor medio de toda la muestra fue de 11,26%, con un coeficiente de variación (COV) de 9.

Ninguno de los cuerpos de prueba ensayados llegó a la rotura total y tampoco se observaron daños fuera del área de la conexión, por lo que puede afirmarse que los valores extraídos expresan el comportamiento real de las uniones ensayadas.

### 3.3.1 Resultados de los ensayos de clavos.

Los resultados de los ensayos realizados a 49 clavos espiralados de 3,1 mm de diámetro aplicando las disposiciones de la norma ASTM-F1575 (2013) se sintetizan en la Figura 17.

Los resultados obtenidos muestran que la media de los valores de tensión de fluencia en flexión fue de 742 N/mm<sup>2</sup>. La carga de fluencia alcanzada fue de 409.25 N y el momento de fluencia de 3683 N/mm.

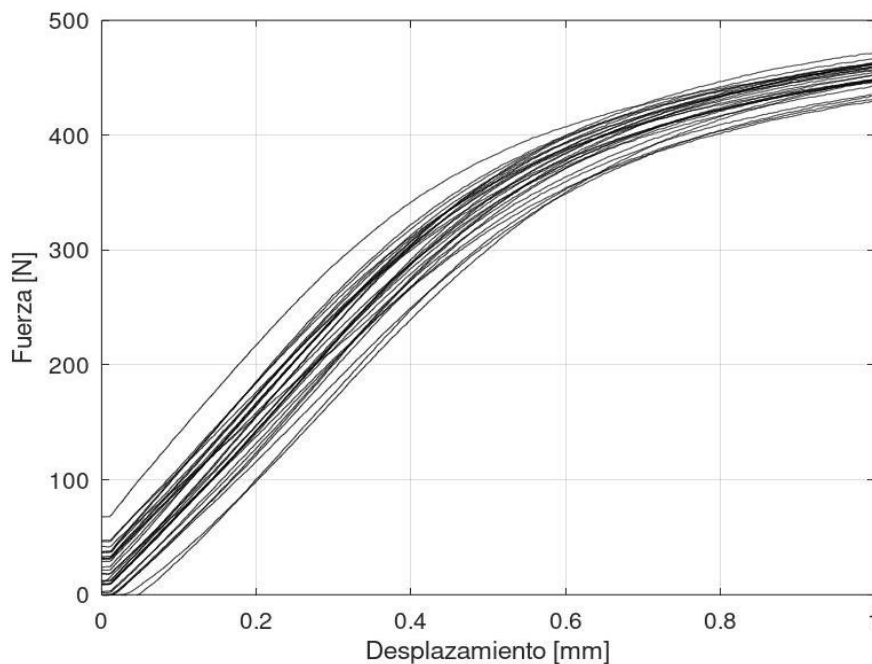


Figura 17 . Gráfica carga – desplazamiento. Ensayo de clavos espiralados 3.1 mm de diámetro.

### 3.3.2 Ensayos de probetas con cargas paralelas a las fibras.

Los gráficos de carga – desplazamiento de cada una de las series de probetas ensayadas se muestran en la Figura 18 y 19. En ellos puede verse que estas exhiben un comportamiento similar, de manera que la carga aumenta linealmente con el desplazamiento con una pendiente relativamente constante que comienza en el origen, que luego continúa de forma no lineal al pasar el límite de fluencia y hasta alcanzar el valor de carga máxima.

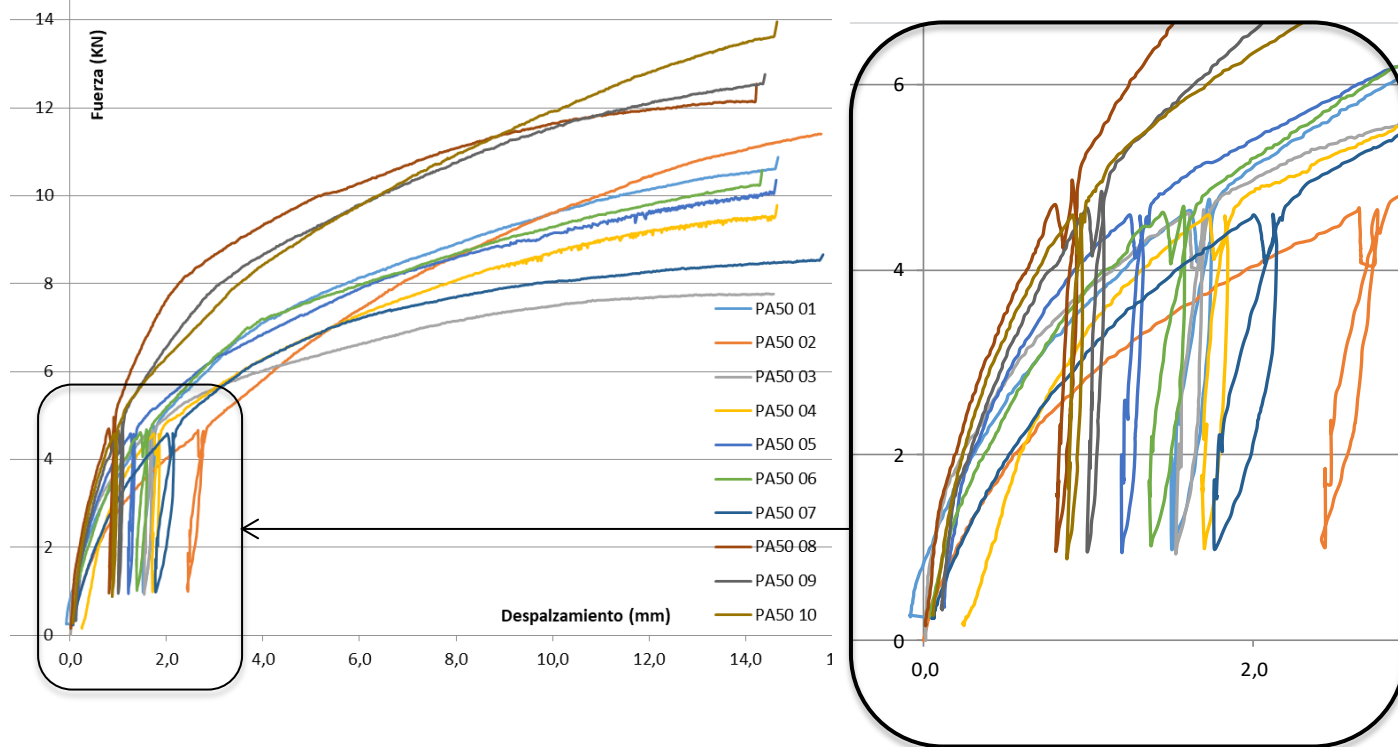


Figura 18. Gráficas carga – desplazamiento de las probetas de la serie PA35

Detalle zona elástica

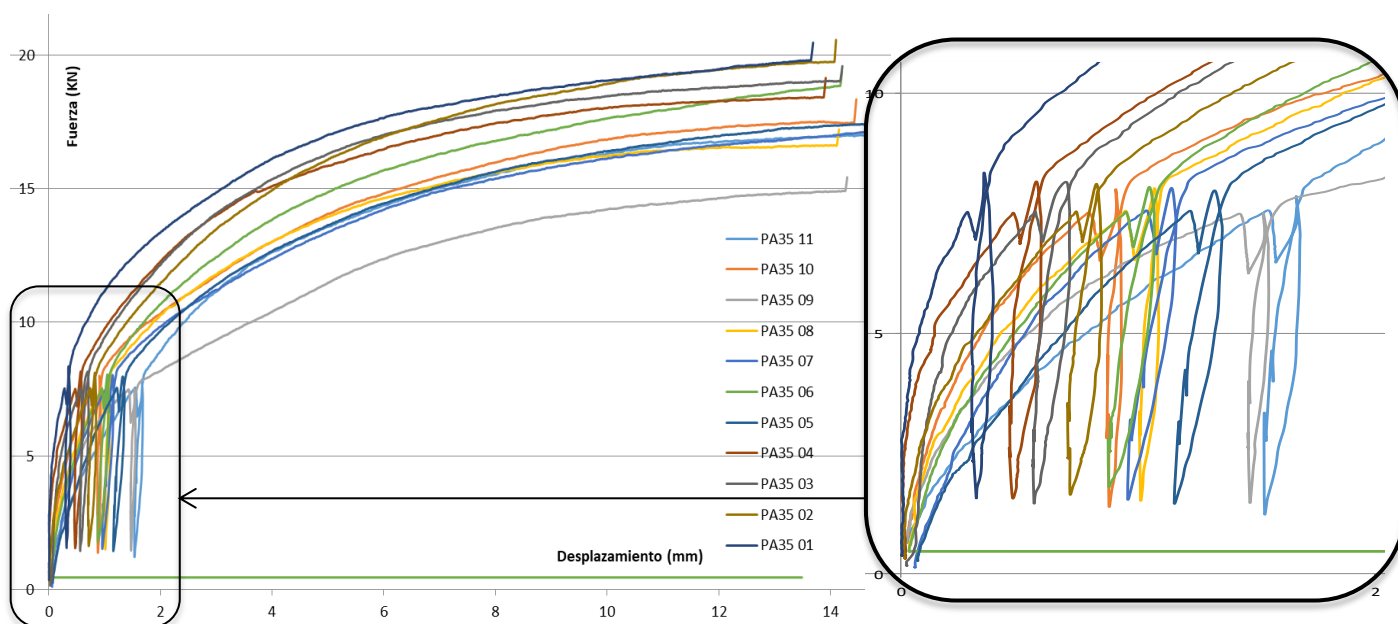


Figura 19. Gráficas carga – desplazamiento de las probetas de la serie PA50

Detalle zona elástica

Tabla 1. Resultados de ensayos de cuerpos de prueba correspondientes a la Serie PA35, realizados de acuerdo a UNE EN 26891 (1991)

ID Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Media
F máx [N]	19797	19740	19033	18411	17412	18854	17139	16620	14923	17469	16997	<b>17854</b> (1474)
F clavo [N]	3300	3290	3172	3069	2902	3142	2857	2770	2487	2912	2833	<b>2976</b> (245)
Desliz. F max [mm]	13,65	14,07	14,17	13,88	14,63	14,18	14,85	14,08	14,27	14,43	14,68	<b>14,26</b> (0,36)
Mod D. [N/mm]	20826	7867	11280	11672	5344	6529	6387	6564	4134	7455	3878	<b>8358</b> (4832)
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	303,6	282,2	293,5	281,1	327,4	288,3	346,6	280,5	350,4	380,1	284	<b>311</b> (34,82)
CH [%]	12,12	12,06	12,2	12,46	12,16	12,3	11,69	12,44	11,78	11,72	11,96	<b>12,08</b> (0,27)

Notas: Valores entre paréntesis indican desviación estándar

Tabla 2. Resultados de ensayos de cuerpos de prueba correspondientes a la Serie PA50, realizados de acuerdo a UNE EN 26891 (1991)

ID Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media
F máx (N)	10615	11407	7768	9531	10097	10247	8532	12142	12548	13632	<b>10652</b> (1820)
F clavo (N)	1769	1901	1295	1589	1683	1708	1422	2024	2091	2272	<b>1775</b> (303)
Desliz. F max (mm)	14,68	15,51	14,54	14,62	14,51	14,3	15,54	14,21	14,36	14,58	<b>15</b> (0,47)
Mod D. (N/mm)	2163	1449	2237	2658	3226	2667	1962	4662	4107	4448	<b>2958</b> (1111)
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	350,4	337,1	304,5	329,1	316,7	336,7	301,2	308,0	286,4	341,6	<b>321,2</b> (20,8)
CH (%)	10,43	11,44	10,40	10,75	10,13	10,89	11,01	10,99	10,82	11,02	<b>10,79</b> (0,38)

Nota: Valores entre paréntesis indican desviación estándar

En las tablas precedentes se incluyen también los valores de densidad determinados para cada muestra, ya que de acuerdo a estudios anteriores (Hilson 1995c, d), sabemos que esta propiedad influye en la capacidad de carga de los clavos. Analizados los valores, se verificó que las distintas sub muestras tienen igual valor medio de densidad, por lo que se asume una influencia igual de esta propiedad sobre los resultados de  $F_{máx}$  obtenidos para todas ellas.

### 3.3.2.1 Capacidad portante

Las probetas de la serie conformada por piezas de 50mm (PA50) presenta promedialmente valores de resistencia menores (en el orden del 60%) que los de la serie con piezas de 35mm (PA35). Dentro de cada serie se registraron valores de resistencia dispares, con COV del orden del 8.3% para los PA35 y del 17.1% para las PA50.

Asimismo, la capacidad máxima por cada clavo se registra dentro del grupo PA35, siendo éstos en promedio, un 68% superiores a los del grupo PA50.

Ambos resultados son coherentes con la forma en que están construidos los cuerpos de prueba, ya que en el grupo PA35 los clavos atraviesan 3 tablas, mientras que en el PA50 sólo lo hacen en 2, lo que implica que en cada plano de corte trabajen solamente 3 de los 6 clavos. Cabe aclarar aquí que, aunque esto no es consistente con los requisitos exigidos en la norma EN1380:2009 que sugiere como cantidad mínima la existencia de 4 clavos por plano de corte, al tratarse de un cuerpo de prueba que es

representativo de una porción de placa NLT de tamaño mayor, los datos obtenidos son válidos y funcionales a los objetivos propuestos. En ese sentido resulta interesante constatar también que, a pesar de tratarse de la mitad de los clavos, los valores de  $F_{m\acute{a}x}$  alcanzados para iguales desplazamientos, como fue mencionado, no se redujeron a la mitad, sino que registran valores cercanos al 60%. Esto podría explicarse, al menos parcialmente, por la densidad de la madera que conforma cada grupo, ya que los valores medios de densidad de los cuerpos de prueba del grupo PA50 es un 3.2% mayor que las del grupo PA35.

Por otra parte, los valores de desplazamiento últimos de la pieza central fueron similares en todos los casos, alcanzando los establecidos en la norma (15mm). Si consideramos estos valores en función de la carga aplicada, los valores medios para la serie PA35 fueron cercanos a 0.73 mm/kN y para los PA50 fueron 1.38 mm/kN. Estos valores en sí mismos no reflejan el comportamiento real de las uniones, ya que no se trata de curvas carga – deformación de comportamiento lineal, pero dan una idea aproximada de la resistencia de cada tipo de unión ante la aplicación de las cargas.

### 3.3.2.2 Modo de rotura

Como fue mencionado anteriormente, ninguna de las probetas usadas para los ensayos llegó a la rotura total ni tampoco registró daños dentro o fuera del área de conexión. De acuerdo a lo estipulado en la norma, el ensayo se detuvo al alcanzar la unión una deformación de 15mm o el valor de la  $F_{m\acute{a}x}$  establecida previamente.

Las curvas carga-deformación de todas las probetas ensayadas muestran un comportamiento similar. Primeramente, se observa un relativamente rápido aumento de la carga que se mantiene hasta alcanzar aproximadamente el 40% de la carga de rotura. Luego de esto, la pendiente comienza a disminuir hasta alcanzar el final del ensayo. Este claro comportamiento no lineal muestra que a valores relativamente bajos de carga comienzan a formarse rótulas plásticas, hecho que podría explicarse por la relativamente alta esbeltez de los clavos. Otros trabajos como el de Zhu (2018) y Sosa Zito (2015) reportan resultados similares, con valores de comportamiento lineales en los 2 o 3 primeros mm de deformación en cuerpos de prueba que presentaron roturas dúctiles similares a los estudiados en esta tesis.

Luego de culminados los ensayos y con el fin de verificar y analizar la deformación de los clavos para poder observar particularmente la formación de las rótulas plásticas, se procedió a abrir las probetas. Como fue mencionado, según la teoría de Johansen (1949), este tipo de deformaciones son de particular importancia a la hora de establecer la capacidad portante y anticipar la producción de roturas dúctiles en las estructuras.

En la Figura 20 se muestran los cuerpos de prueba pertenecientes a la serie PA35. Allí pueden verse con claridad la presencia de rótulas plásticas, pero, según el caso, pueden constatarse algunas particularidades:



En todos los casos pueden verse los clavos flexionados en los que se manifiestan al menos 2 rótulas plásticas, una en la pieza central y otra en la lateral que contiene la cabeza del clavo, mostrando características del tipo j y k del Eurocódigo 5 (EN 1995- 1-1 2005). Pueden verse también, en sectores cercanos a los planos de corte, aplastamiento de las fibras de la madera.

Por otra parte, en algunos de los clavos puede observarse una tercera rótula, que en la mayor parte de los casos está asociada a la presencia de algún nudo o zona nudosa. En esos casos la deformación del clavo no es tan suave, presentando quiebres abruptos en la curvatura. En otros casos, en que no se constata la presencia de ningún defecto en la madera, la rótula es de una curvatura menor que las 2 principales. Se constató que en estos casos la densidad de la madera era mayor y por tanto opuso mayor resistencia al aplastamiento de las fibras.

También, en algunas de las probetas se manifestaron desplazamientos de las cabezas de los clavos hacia el interior de la madera. Este fenómeno se produjo en las piezas de madera de menor densidad que opusieron menor resistencia a su desplazamiento.



Figura 20. Piezas sometidas a doble cizalle (serie PA35) con deformaciones de los clavos luego de ser ensayados.

En la Figura 21 se muestran los cuerpos de prueba pertenecientes a la serie PA50. Los clavos en este caso están sometidos solamente a un plano de corte y en todos los casos se los puede ver flexionados con al menos 1 rótula plástica, ubicada en la pieza de madera lateral que contiene la cabeza del clavo, mostrando características del tipo j y k de los modelos de deformación establecidos por Johansen (1991). Pueden verse también, en sectores cercanos a los planos de corte, aplastamiento de las fibras de la madera. Al igual que en las de la serie PA35, algunos de los clavos contienen una rótula adicional

relacionada con la presencia de nudos y pudieron verse desplazamientos de las cabezas de los clavos hacia el interior.

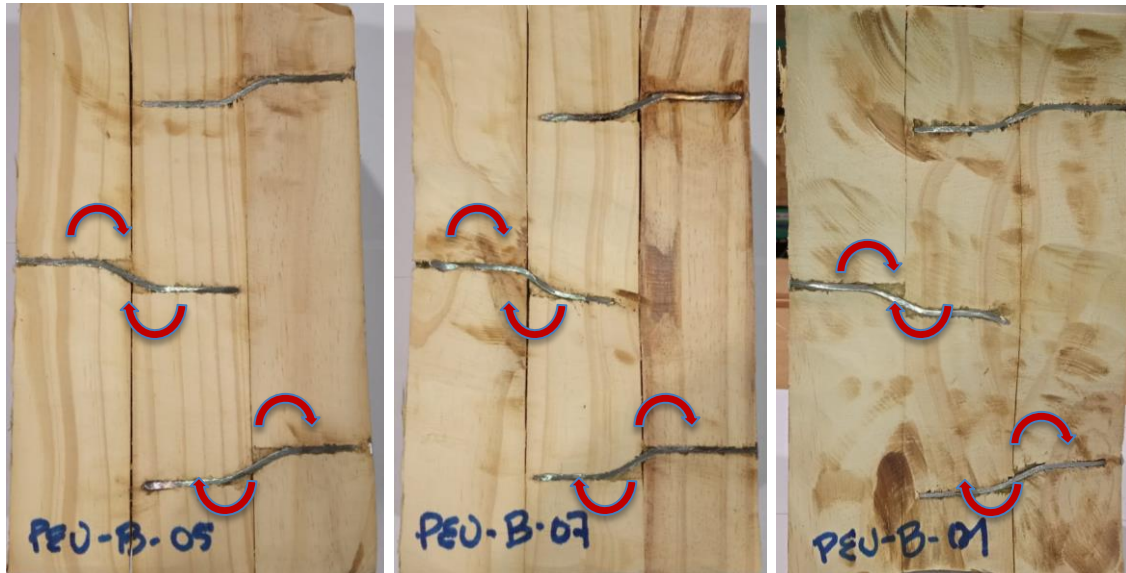


Figura 21. Piezas sometidas a cizalle simple (serie PA50) con deformaciones de los clavos luego de ser ensayados

### 3.3.2.3 Deslizamiento de las conexiones.

En la Tabla 1 y la Tabla 2 están incluidos también los valores del módulo de deslizamiento instantáneo ( $K_s$ ) en las conexiones. Este valor se expresa en N/mm siguiendo el criterio de la norma de ensayo EN 26891 (1991) y representa la fuerza necesaria en cada elemento de fijación para producir un deslizamiento unitario de la conexión. Este, como vimos en el apartado anterior, se origina por la suma de 2 fenómenos: la deformación en flexión de los clavos y el aplastamiento de la madera.

Los resultados obtenidos en cada una de las series muestran valores promedialmente mayores (220%) en los cuerpos de prueba de la serie PA35 que en la PA50. Esta diferencia es coherente con la forma en que se ensambló cada probeta, ya que, como se comentó anteriormente, los elementos de unión de las PA50 solo atraviesan 2 tablas mientras que en las PA35 lo hacen a través de 3 de ellas. Por otra parte, si consideramos los valores alcanzados por las probetas dentro de cada serie, encontramos diferencias importantes que, seguramente respondan a diferentes densidades de las maderas usadas.

### 3.3.3 Ensayos de probetas con cargas perpendiculares a las fibras.

Los gráficos de carga – desplazamiento de cada una de las probetas de esta serie se muestran en la Figura 22. En ellos puede verse que estas exhiben un comportamiento similar al descrito en las de carga paralela, con un comienzo lineal que se curva hasta alcanzar la carga máxima.

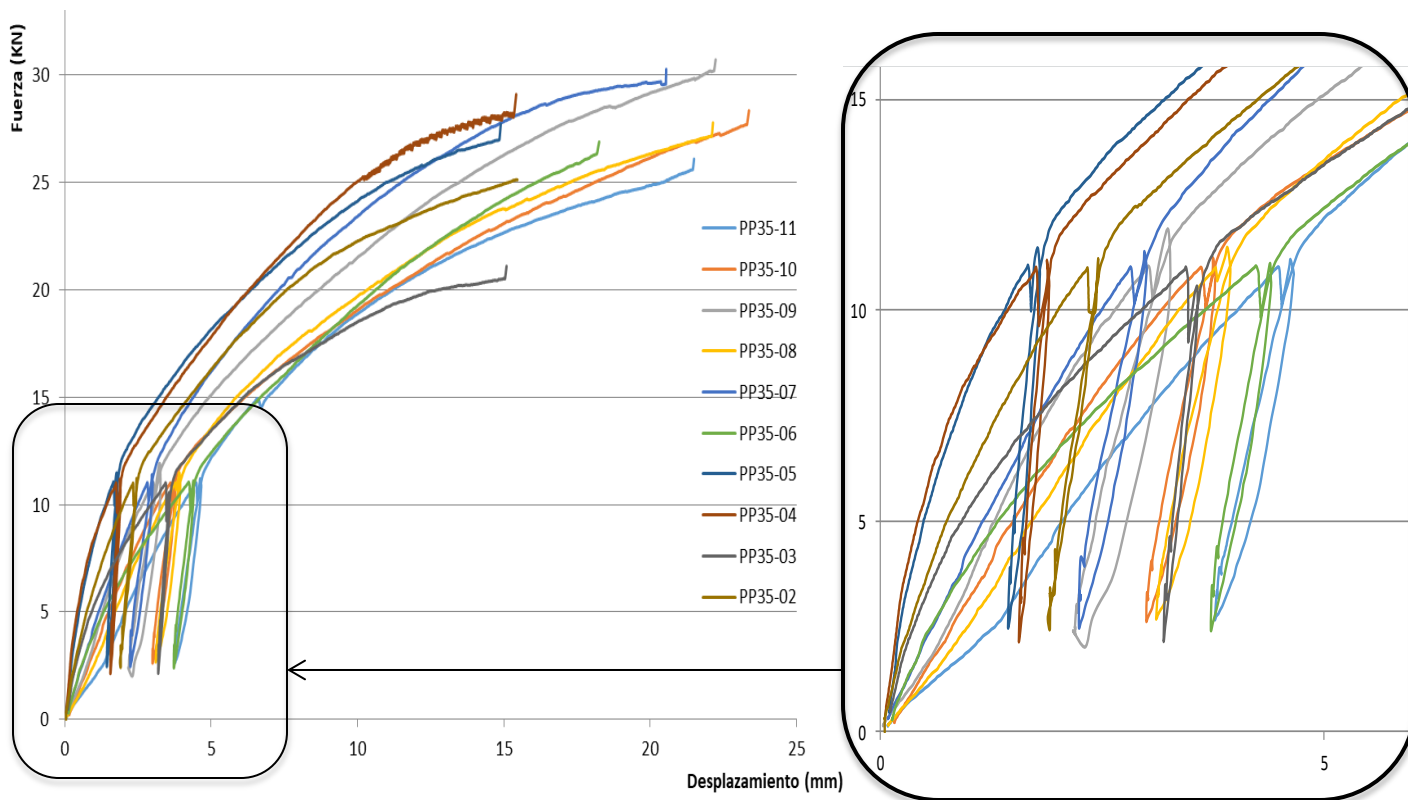


Figura 22. Gráficas carga – desplazamiento de las probetas de la serie PP35

Detalle zona elástica

La Tabla 3 muestra los resultados de los ensayos de corte realizados de acuerdo a UNE EN 26891 (1991).

Tabla 3. Resultados de ensayos de cuerpos de prueba correspondientes a la Serie PP35, realizados de acuerdo a UNE EN 26891 (1991)

ID Probeta	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Media
F máx [N]	25114	20514	28216	26981	26330	29564	27141	30186	27688	25595	<b>26733</b> (2709)
F clavo [N]	2790	2279	3135	2998	2926	3285	3016	3354	3076	2844	<b>2970</b> (301)
Desliz. F max [mm]	15,4	15,04	15,36	14,85	18,18	20,54	22,11	22,18	23,31	21,46	<b>19</b> (3,44)
Mod D. [N/mm]	4246	2731	5370	5851	2342	3865	3643	3805	3051	2698	<b>3760</b> (1151)
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	289,9	299,8	290,4	315,6	294,2	325,9	286,4	298,9	286,8	281,6	<b>297</b> (13,94)
CH [%]	10,55	11,32	11,32	11,61	7,859	10,78	11,75	12,45	9,687	11,08	<b>11</b> (1,28)

Notas: Valores entre paréntesis indican desviación estándar

### 3.3.3.1 Capacidad portante

Los valores promedio obtenidos muestran que las probetas de esta serie alcanzaron valores de resistencia 50% mayores a los de las probetas ensayadas en dirección paralela a las fibras. Asimismo, dentro de la serie se registraron valores de resistencia dispares entre los diferentes cuerpos de prueba, con COV del orden del 10%.

Por otra parte, el esfuerzo al que fue sometido promedialmente cada clavo es prácticamente el mismo (99%) que el registrado en la serie PA35. En ambos casos las cargas soportadas por cada clavo (media = 2970N y 2975N) fueron cercanas al 50% de su capacidad máxima (6000N).

Todos los valores son coherentes con la forma de armado y disposición de las piezas en el cuerpo de prueba, que presenta 2 diferencias sustanciales con las de la serie PA35: mayor cantidad de clavos (9 en vez de 6) y disposición de las piezas de modo de recibir las cargas en la dirección perpendicular a las fibras. De todos modos, el esfuerzo recibido en cada clavo muestra valores similares en ambas series, por tanto, es probable que la disposición perpendicular de las fibras ante los esfuerzos de carga haya colaborado en aumentar la resistencia de las probetas. La similitud de estos valores confirma también que la fuerza transmisible por cada clavo no varía con la dirección de las fibras si se respetan los parámetros geométricos recomendados en la norma y si no aparecen otras fallas por roturas prematuras en la madera.

### 3.3.3.2 Modo de rotura

Las consideraciones generales acerca del comportamiento mecánico de estas probetas, referidas a la ausencia de rotura, las curvas carga deformación y la conformación de las rótulas plásticas son coincidentes con las de las probetas PA35 y PA50.

Las probetas también fueron abiertas de modo de verificar y analizar la deformación de los clavos para poder observar particularmente la formación de las rótulas plásticas.

En la Figura 23 se muestran los cuerpos de prueba pertenecientes a la serie PT35. Allí pueden verse con claridad la presencia de rótulas plásticas, al menos 2, una en la pieza central y otra en la lateral que contiene la cabeza del clavo, mostrando características del tipo j y k del Eurocódigo 5 (EN 1995- 1-1 2005). Pueden verse también, en sectores cercanos a los planos de corte, importantes manifestaciones de aplastamiento de las fibras de la madera, mayores que las observadas en las de las series PA35 y PA50, probablemente debido a que las cargas y los deslizamientos alcanzados fueron mayores y a que la densidad media de las tablas que componen este grupo, es aproximadamente un 5 % menor.

También, en todas las probetas se manifestaron desplazamientos de las cabezas de los clavos hacia el interior de la madera.



Figura 23. Piezas sometidas a cizalle doble (Serie PT35) con deformaciones de los clavos luego de ser ensayados.

### 3.3.3.3 Deslizamiento de las conexiones.

En la Tabla 3 están incluidos también los valores del módulo de deslizamiento instantáneo ( $K_s$ ) en las conexiones.

Los resultados obtenidos para esta serie muestran valores menores (-42%) a los obtenidos en los cuerpos de prueba de la serie PA35. Estos resultados son consistentes con los reportados por Sosa Zito (2015) que encontró valores de  $K_s$  inferiores en las probetas cargadas en dirección perpendicular a las fibras que en las paralelas, confirmando que para las conexiones múltiples con clavos de pequeño diámetro, existe una importante influencia de la dirección de las fibras sobre los valores del módulo de deslizamiento instantáneo.

Por otra parte, si consideramos los valores alcanzados por las probetas dentro de cada serie, encontramos diferencias importantes. Éstas responden a diferentes densidades de las maderas usadas.

### 3.3.3.4 Ensayos de probetas de 9 tablas en dirección paralela a las fibras.

La Figura 24 esquematiza el proceso de aplicación de cargas.

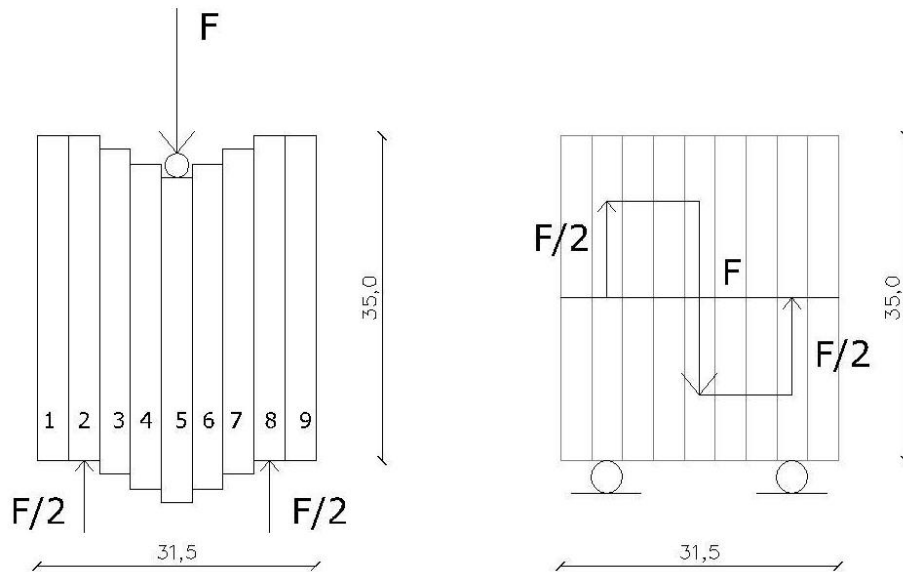


Figura 24. Probeta luego de aplicar cargas y fuerzas de corte.

En las Figura 25 y 26 se exhiben los gráficos de carga–desplazamiento de las probetas de cada serie.

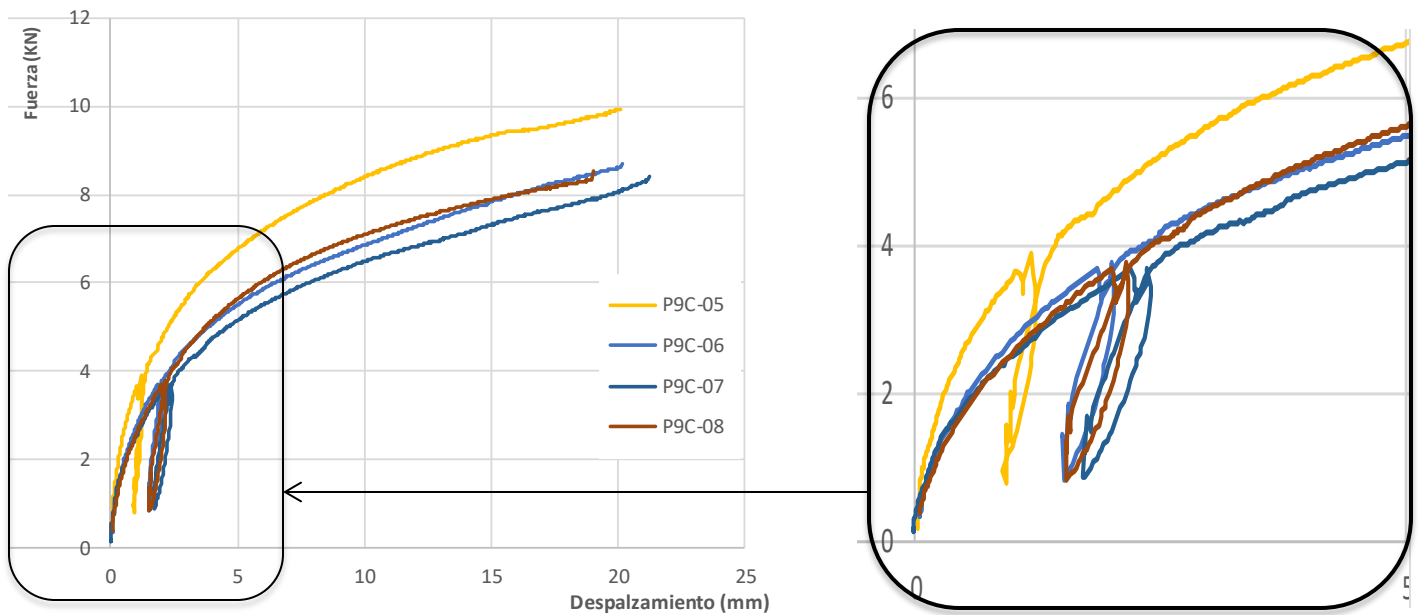


Figura 25. Curvas carga – desplazamiento. Serie P9C

Detalle zona elástica

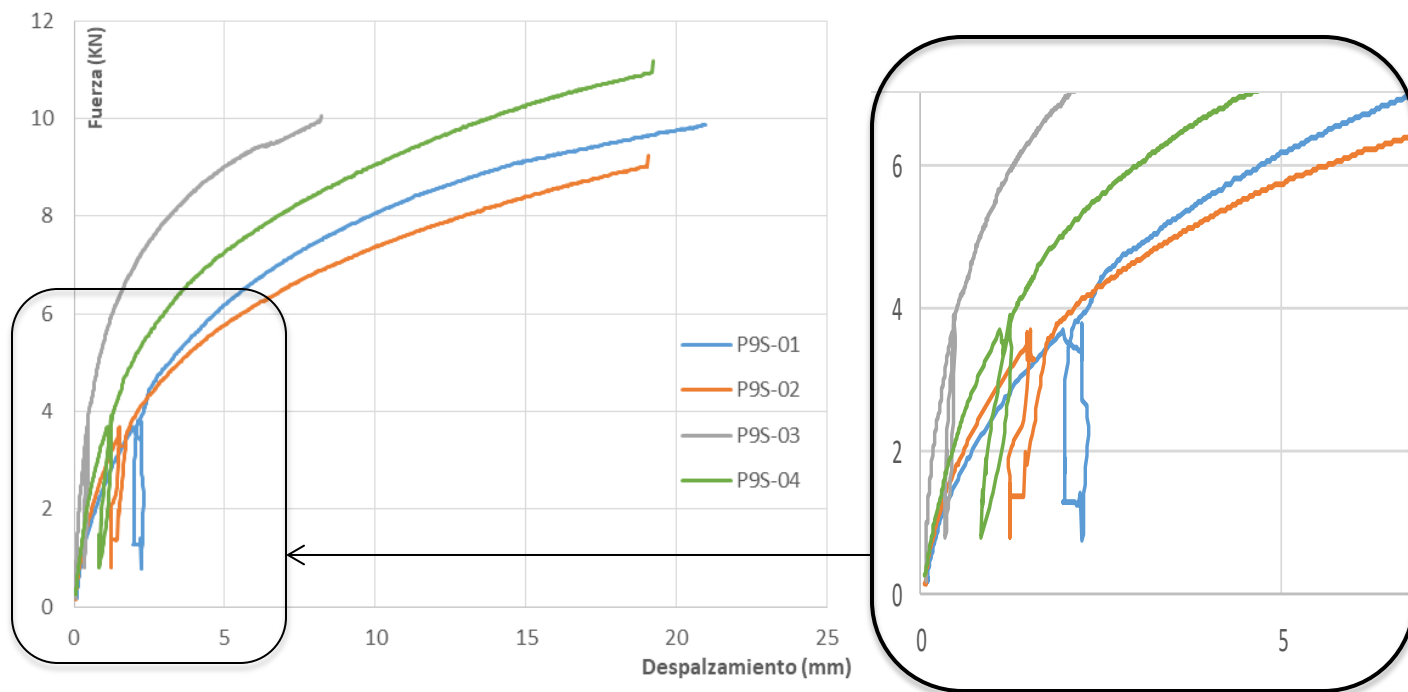


Figura 26. Curvas carga – desplazamiento. Serie P9S

Detalle zona elástica

La Tabla 4 indica los resultados de los ensayos de corte realizados de acuerdo a la norma UNE EN 26891 (1991).

Tabla 4. Resultados de ensayos de cuerpos de prueba correspondientes a las Series P9S y P9C, realizados de acuerdo a UNE EN 26891 (1991)

Probeta	P9S				P9C			
	1	2	3	6	4	5	7	8
F máx. (N)	9031	9899	9946	10945	10313	8616	8315	8334
F clavo (N)	1129	1237	1243	1368	1289	1077	1039	1042
Desliz. F max (mm)	20,91	19,31	8,19	19,16	20,03	20,08	21,15	18,93
Mod D. (Ks) (N/mm)	1452	2200	7520	3005	2796	1635	1351	1521
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	324,8	362,2	420,9	380,3	350,7	347,6	365	335,7
CH (%)	11,85	11,59	11,96	12,07	12,11	11,83	12,12	11,77

#### 3.3.3.5 Capacidad portante y módulo de deslizamiento.

Los valores obtenidos de los ensayos de estas probetas permiten comparar el comportamiento de las 2 series -con film (P9C) y sin film (P9S) de polietileno- de modo de evaluar la influencia de la fricción entre las láminas.

Los valores medios de carga máximos alcanzados por las probetas y por ende los soportados por cada clavo del grupo P9S son 12% superiores a los de la serie P9C.

El módulo de deslizamiento medio de la serie P9S fue 21% superior a los de las P9C.

De estos resultados entonces puede deducirse que existe un importante aporte del rozamiento en la resistencia de los cuerpos de prueba que debe ser tomado en consideración a la hora de confeccionar las placas de tamaño real. Otros ensayos, p. ej. de carga perpendicular a las fibras, deberían realizarse en estas probetas, de modo de poder cuantificar el efecto de este fenómeno cuando las placas sean posicionadas horizontalmente.

#### 3.3.3.6 Modo de rotura

Las consideraciones generales acerca del comportamiento mecánico de estas probetas referidas a la ausencia de rotura, las curvas carga deformación y la conformación de las rótulas plásticas son coincidentes con las de las probetas PA35, PA50 y PT35.

Al igual que en los casos anteriores, analizando los datos de las curvas carga-deformación puede constatarse que a valores relativamente bajos de carga comienzan a formarse rótulas plásticas, hecho que se explica por la alta esbeltez de los clavos.

Luego de culminados los ensayos y con el fin de verificar y analizar la deformación de los clavos para poder observar particularmente la formación de las rótulas plásticas, se procedió a abrir las probetas.

En la Figura 27 se muestran dos cuerpos de prueba, uno pertenecientes a la serie P9C y otro a la P9S. Allí pueden verse con claridad la presencia de rótulas plásticas, pero, según la ubicación de los clavos, pueden constatarse diferentes tipos de deformaciones, que responden a los tipos f y k del modelo de Johansen adoptado por el Eurocódigo 5 (EN 1995- 1-1 2005) y a otro no previsto allí.

Modo "f": clavos ubicados en las láminas 1 a 3 y 7 a 9, que presentan sólo una rótula muy leve ubicada entre las láminas 2 - 3 y 8 - 9, únicas láminas que registran desplazamientos (entre 1-2 y 8-9 no se registra plano de corte debido a que las láminas 2 y 8 se asientan sobre los apoyos).

Modo "k": clavos ubicados en las láminas 4, 5 y 6 (en el eje de la probeta) sometidos a doble plano de corte, que presentan 3 rótulas.



Modo no previsto: clavos ubicados en las láminas 2 a 4 y 6 a 8, sometidos también a doble plano de corte, pero cuyo deslizamiento tiene igual dirección. En este caso se registran al menos 2 rótulas, presentando el clavo una deformación asimétrica.

En algunos casos pueden verse también, en sectores cercanos a los planos de corte, aplastamiento de las fibras de la madera. Se registraron también en algunos de los cuerpos de prueba, desplazamientos de las cabezas de los clavos. La Figura 28 muestra en detalle estas deformaciones.



Figura 27. Deformación de los clavos luego de la aplicación de las cargas. Serie P9S.



Figura 28. Detalle de deformaciones en clavos.

### 3.4 Conclusiones

Las probetas conformadas por 3 tablas de 50mm (PA50) cargadas en dirección paralela a las fibras, presentan valores de resistencia global y por clavo 40% menores que las conformadas por 3 tablas de 35mm (PA35). En consonancia, la media del módulo de deslizamiento de la serie PA35 supera por más del doble a la media de los registrados en la serie PA50. Estos resultados son consistentes con los reportados en la literatura y dispuesto en códigos de construcción en cuanto al aumento en la capacidad de carga de las uniones cuando los clavos atraviesan más de 2 tablas. En ese sentido, se constató que, a pesar de que en las probetas PA50 contaban con la mitad de los clavos por plano de corte que las PA35, los valores de  $F_{max}$  alcanzados para iguales desplazamientos, no se redujeron a la mitad, sino que registran valores cercanos al 60%. Probablemente las fuerzas de rozamiento entre las piezas de madera contribuyan a esta mejora, tal como se observó en los ensayos de las probetas de 9 tablas.

Para el caso de las probetas cargadas de forma perpendicular a las fibras (PP35) se registraron valores que, a pesar de ser un 50% más resistentes, mostraron valores de módulo de deslizamiento un 42% menores que las de la serie PA35. Estos resultados están en consonancia con los encontrados por Sosa Zito (2015) quien encontró en sus ensayos menores valores de  $K_s$  en las probetas cargadas en dirección perpendicular a las fibras, confirmando que, para las conexiones múltiples con clavos de pequeño diámetro, existe una importante influencia de la dirección de las fibras sobre los valores del módulo de deslizamiento instantáneo.

De los resultados de los ensayos realizados con probetas conformadas 9 tablas puede deducirse que el aporte del rozamiento en la resistencia de los cuerpos de prueba es significativo y debe ser tomado en consideración a la hora de confeccionar las placas de tamaño real, ya que los valores medios de carga máximos alcanzados por las probetas y por ende los soportados por cada clavo del grupo P9S son 12% superiores a los de la serie P9C y que el módulo de deslizamiento medio de la serie P9S fue 21% superior a los de las P9C.

Por otra parte, analizados los modos de falla de las 4 series de probetas se constató que ninguna de ellas llegó a la rotura total ni tampoco registró daños fuera del área de conexión, por lo que puede afirmarse que las uniones registraron un comportamiento dúctil en todo el periodo de carga al que fueron sometidas.

Asimismo, se constató que los modos de falla fueron similares a los indicados por Johansen, ya sea para las cargas perpendiculares como en las paralelas a las fibras. Solamente se manifestaron deformaciones no previstas en el modelo en casos de incidencia de las cargas en los planos de corte que el modelo no analiza (probetas de 9 tablas con doble plano de corte con fuerzas de igual dirección y sentido)

## 4 Determinación experimental de las propiedades de flexión de placas de madera laminada clavada construidas con pino uruguayo.

### Resumen

Uruguay necesita desarrollar sistemas constructivos en madera que permitan agregar valor en la cadena productiva forestal-maderera, a través del desarrollo de sistemas que empleen masivamente madera, en particular placas de madera laminada clavada (NLT) para su empleo en entresijos, techos y paredes de edificaciones residenciales. Las placas NLT consisten básicamente en la unión mecánica de un conjunto de tablas para conformar un elemento estructural sólido. Las láminas se colocan cara a cara y las uniones se realizan a través de clavos metálicos. El objetivo de este trabajo fue determinar experimentalmente las propiedades de flexión de placas NLT construidas con tablas de pino uruguayo (*Pinus elliottii*) de rápido crecimiento y clavos metálicos. Para ello se construyeron y ensayaron 2 series de placas NLT: una conformada por láminas enteras (PLE) y otra por láminas discontinuas -en una razón de 2/3 y 1/3- intercaladas con las enteras (PLC), todas ellas conformadas por 9 láminas de 35mm x 145mm de sección transversal clavadas entre sí con clavos espiralados de 100mm de longitud y 3.1mm de diámetro, conformando placas de 315mm x 145mm x 2850mm. Se realizaron ensayos de flexión de 4 puntos de modo de determinar sus propiedades mecánicas y se registraron sus modos de falla. Los resultados obtenidos muestran que todas las placas mantienen un comportamiento elástico hasta su rotura, las placas PLE tienen un MOE que duplica los valores de las PLC y un MOR un 30% superior que éstas. Por otra parte, pudo determinarse que los valores de MOE de las placas PLE son cercanos o superiores a los del promedio de los de las láminas que las componen, por lo que puede afirmarse que las uniones clavadas colaboran en el trabajo conjunto de las láminas y mejoran la rigidez de la placa. Por último, se observó que los modos de rotura detectados en las placas se debieron a fallas por tracción, originados mayormente por desviaciones de las fibras muy pronunciadas y por desviaciones debidas a la presencia de nudos o zonas nudosas.

Palabras clave: madera laminada clavada, NLT, pinos uruguayos, *Pinus elliottii*, clavos metálicos, propiedades de flexión, modos de falla.

### 4.1 Introducción

La construcción con sistemas constructivos que emplean masivamente madera, denominados “mass timber” ha ganado un lugar importante y se ha convertido en una alternativa relevante para la construcción de edificios de mediano y gran porte.

Además de tratarse de sistemas constructivos que implican en todo su proceso una menor huella de carbono, la construcción en madera presenta otras ventajas como la reducción de tiempos de obra y la baja de los costos de construcción. Por ello la adopción de estos sistemas viene incrementándose a nivel mundial, impulsados fundamentalmente por políticas gubernamentales para cuidar el medio ambiente y cumplir con los objetivos del Acuerdo de París (Naciones Unidas 2015). Adicionalmente, la necesidad de reducir los tiempos de ejecución de obras y mejorar las prestaciones de las edificaciones, ha motivado a ingenieros y arquitectos a considerar el empleo de estos sistemas para la producción de edificios en altura, cuyo límite está más relacionado con trabas establecidas en los códigos de construcción que con las posibilidades tecnológicas del material (Ramage et al 2017).

Debido a una política forestal que cuenta con más de 30 años de implementación, Uruguay está actualmente en condiciones de agregar valor en la cadena productiva forestal maderera con el desarrollo de sistemas constructivos que empleen masivamente madera. En particular placas de madera laminada clavada/tarugada (NLT/DLT) para su empleo en entresijos, techos y paredes de edificaciones residenciales. Las placas NLT pueden ser producidas en las dimensiones habituales para las viviendas de interés social, de modo tal que su fabricación y/o manipulación permita la participación de mano de obra no especializada. Estas tecnologías, además, que en los países desarrollados se aplican cada vez más para la construcción de edificios residenciales de varios niveles, en Uruguay podrían utilizarse también en conjuntos residenciales destinados a sectores de la población con ingresos medios-altos.

Los elementos laminados clavados de madera (NLT por su sigla en inglés) forman parte de la familia de productos de madera masiva, junto con los paneles de madera tarugada (DLT), de madera laminada encolada (GLT) y los de madera contra-laminada (CLT). Están compuestos por la unión clavada de elementos simples de madera (tablas) con el objetivo de conformar un elemento estructural sólido.

Hasta fines del siglo XX no existían demasiados trabajos de investigación que estudiaran el comportamiento mecánico de este tipo de paneles y exploraran posibles variantes en su conformación. Pueden mencionarse como referencia los trabajos desarrollados por Natterer y Sandoz en Suiza (1996), citados por Tannert (2002) en los que estudia el uso de tablas de bajo costo unidas por clavos o tarugos de madera para conformar paneles que adquieran nuevas prestaciones estructurales o Jung (1999) quien hace lo mismo para paneles conformados por tablas unidas por tarugos de madera que conforman elementos de gran escala. Haller y Pannke (1998) estudiaron también el comportamiento estructural y físico de elementos de NLT y Dávalos et Al. (1993) estudiaron el comportamiento a la flexión de "decks" de madera laminada conformados con piezas unidas a tope.

En nuestra región pueden citarse las investigaciones realizadas por Tannert (2002) en Chile que estudió los elementos laminados clavados constituidos por tablas de Pino Radiata -la variante mas expandida en ese país- para la construcción de viviendas constituidas por paneles prefabricados de dimensiones

reducidas que permitieran una fácil transportabilidad y montaje sin la necesidad de utilizar maquinaria pesada, demostrando que esto era posible.

En los últimos años varios trabajos se han dedicado a estudiar el comportamiento mecánico de paneles conformados por tablas unidas mecánicamente por clavos o tarugos.

Entre ellos pueden citarse los realizados por Bocquet (2007) que estudia 2 tipos de uniones; clavos de 88.9mm y tarugos de haya de 10mm y concluye que las propiedades de resistencia y rigidez de los paneles NLT y DLT dependen principalmente del tipo, diámetro, largo y separación del elemento de fijación y del tipo de madera utilizada. Por otra parte, Alan and Ansell (2012) estudiaron el efecto de las diferentes separaciones entre los elementos de fijación en los paneles de NLT, concluyendo que los patrones de clavado de mayor separación y menor cantidad de clavos evitan la propagación clavo a clavo de las fallas por tracción de la madera ante esfuerzos de preso-flexión, mientras que a partir de determinada distancia, la reducción de la separación y el aumento del número de clavos tienen el efecto contrario, ya que las perforaciones producidas por los clavos actúan como un defecto inducido en la madera.

Holstein (2011) tras estudiar los paneles conformados por tablas unidas por diferentes tipos de clavijas afirma que los principales problemas a controlar en su comportamiento ante las sollicitaciones son las grandes deformaciones ante esfuerzos de preso flexión y las posibles delaminaciones entre los elementos y que independientemente del tipo de estructura o material, los sistemas estructurales pueden comportarse como una unidad sólo si se establece una interconexión adecuada y correcta de los componentes. En ese sentido Ogunrinde (2019) en sus ensayos en paneles conformados por láminas clavadas de diferentes largos concluye que la unión mediante los clavos convierte *una matriz frágil en un material dúctil* ya que esta unión actúa como un atenuador de fallas producidas por la tracción soportada por cada una de las tablas, que a su vez permite que éstas tengan capacidad de reserva después de producida la primera fisura en sus fibras.

Por otra parte, Ogunrinde (2019) y Ma (2019) estudiaron la incidencia en la resistencia y rigidez de la presencia de juntas producidas por las uniones a tope en los paneles conformados por láminas discontinuas en su totalidad o intercaladas con láminas enteras. Diferentes formas de combinarlas producen variados resultados, pero en todos los casos afirman que la utilización de madera con baja cantidad de defectos y el refuerzo de las uniones mediante la aplicación de clavos complementarios, aumenta significativamente la resistencia del panel. Ma (2019) basado en los estudios de Williams (1994) muestra que el aumento de la distancia entre juntas a tope en láminas adyacentes o cercanas favorece la resistencia del panel, debido al mecanismo de transferencia de las cargas. Paneles de NLT con un espaciado más corto entre las juntas a tope en capas adyacentes tuvieron que transferir carga a una distancia más corta (es decir, con menos clavos), y, en consecuencia, al aumentar las fuerzas a soportar por los clavos, estos alcanzan su capacidad límite antes de que se alcancen las tensiones definitivas de

flexión de la madera (Williams et al., 1994). Por otra parte Haller y Panke (1998) en los estudios mencionados anteriormente concluyeron que una distribución regular de las uniones a tope dentro de un panel reduce su resistencia a la flexión en un 20% aproximadamente, mientras que distribuciones más irregulares la afectan de menor manera.

En cuanto al desarrollo normativo, no existe en la región normativa específica para la construcción de paneles y placas conformadas por elementos laminados clavados. En Norteamérica sí. Los códigos de construcción tanto de Estados Unidos (2015 International Building Code, ANSI/AWC NDS-2015 National Design Specification (NDS) for Wood Construction) como de Canadá (CSA O86 “Engineering design in wood” (CSA 2014a) and CSA S6 “Canadian Highway) bridge design code” (CSA 2014b), incluyen especificaciones técnicas concretas basadas en investigaciones desarrolladas al respecto, algunas de ellas incluidas en esta reseña. En ellos se establecen determinados parámetros a seguir, dependiendo del espesor de la madera usada y el largo, diámetro y tipo de clavos. Se establecen entre otras cosas: distancias de los clavos a los bordes, patrones de clavado, espaciamiento entre los mismos, distribución y separación de las juntas a tope de las láminas discontinuas.

Estas recomendaciones están recopiladas en una publicación común a los 2 países “Nail Laminated Timber, Canadian (or US) design and construction guide”. En ellas pueden encontrarse recomendaciones técnicas como las mencionadas, así como recomendaciones de “apoyo y orientación inmediatos para garantizar un uso seguro, predecible y económico del NLT”.

## **4.2 Materiales y métodos**

En este capítulo se describen los métodos utilizados en el desarrollo de la etapa destinada a estudiar de manera experimental el comportamiento estático de las placas laminadas clavadas bajo solicitaciones de flexión.

Tanto la preparación de los prototipos como el desarrollo de los ensayos requirieron la aplicación de metodologías adaptadas a las particularidades de cada caso.

Para el diseño de los prototipos se tomaron como referencia:

- 1) los resultados de la capacidad portante y el deslizamiento de las uniones múltiples con clavos de pequeño diámetro ensayadas previamente conforme a la norma EN 1380 (2009) sobre cuerpos de prueba normalizados.
- 2) las propiedades mecánicas y físicas de la especie investigada obtenidas mediante ensayos de flexión realizados para caracterizar las tablas utilizadas.
- 3) los requerimientos de diseño relacionados a la finalidad de las construcciones y a las cargas previstas.

El estudio fue realizado en dos etapas: i) la etapa I involucró el análisis del principal material constitutivo de las placas NLT (i.e. vigas de madera); y la etapa II focalizó en el estudio de las placas NLT de tamaño estructural.

#### 4.2.1 Etapa I- Vigas de madera

Para este trabajo se seleccionaron 250 vigas de tamaño estructural (50 mm x 150 mm x 3000 mm) de pino (*Pinus elliottii* y *P. taeda*) provenientes de dos aserraderos ubicados en la zona noreste de Uruguay. Luego del proceso de secado en horno convencional hasta aproximadamente 12% de contenido de humedad (CH), las vigas fueron embaladas en film de polietileno y trasladadas al Departamento de Materiales y Productos Forestales del LATU para su posterior procesamiento y análisis. Todas las vigas fueron cepilladas en sus cuatro caras y clasificadas visualmente de acuerdo a UNIT 1261 (UNIT 2018). El resultado fue diverso, observándose un bajo porcentaje de rechazo (en el entorno del 10 %) y porcentajes similares de vigas de calidad visual EC1 y EC0.

Luego, todas las vigas fueron adicionalmente cepilladas (35 mm x 145 mm x 2850 mm) e identificadas con un número, siguiendo dos objetivos: i) eliminar los alabeos admisibles en UNIT 1261 y generar secciones transversales con geometrías uniformes y de idénticas dimensiones a lo largo de su eje longitudinal que posibiliten el correcto armado de las placas NLT; y ii) obtener vigas cuyas dimensiones (b) sean tales que el elemento de unión (i.e., clavos de acero de 100 mm de longitud) atraviese al menos el espesor de dos piezas y media, tal como especifica Guía “Nail Laminated Timber, Canadian (or US) design and construction guide”.

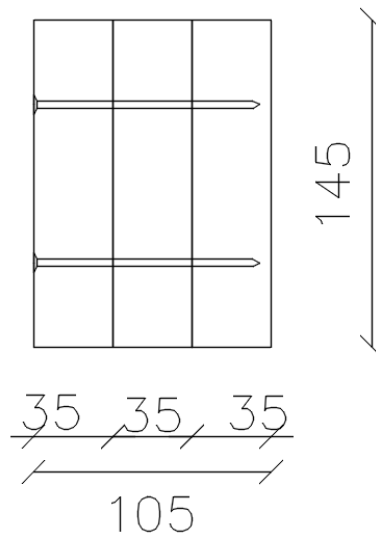


Figura 29 Penetración de los clavos en las piezas de madera.

#### 4.2.1.1 Estimación de las propiedades estructurales

El módulo de elasticidad de las vigas fue estimado mediante i) ensayos no destructivos (NDT) de ondas de impacto y ii) de flexión.

Previo a los ensayos NDT, para cada viga se determinó el CH con xilohigrómetro de púa de resistencia eléctrica con una precisión de  $\pm 2\%$  y la densidad, computando el cociente entre el volumen (estimado con calibre marca Mitutoyo) y la masa (registrada con de precisión Mettler Toledo PG503-S).

Inmediatamente después, se estimó el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ), por el método de onda de impacto utilizando el equipo NDT (Fakopp Microsecond Timer) de acuerdo a (1):

$$E_d = \rho \times v^2 \quad (1)$$

donde:  $\rho$  es la densidad de la viga ( $\text{kg/m}^3$ ) al momento de ensayo, y  $v$  es la velocidad de propagación de onda sónica en recorrer la distancia entre dos transductores, cada uno ubicado en las testas de la viga, estimada con el equipo NDT (m/s).

Luego de los ensayos dinámicos, se procedió a evaluar las vigas a flexión estática en cuatro puntos de acuerdo a EN 408 (AENOR 2016), con la disposición de la viga simplemente apoyada y la aplicación de dos cargas en los extremos del tercio central. Se utilizó una máquina universal Minebea con una celda de carga de 250 kN y con capacidad para aplicar cargas a velocidad constante (ver Figura 34). La deformación fue medida con dos extensómetros ubicados en el plano neutro en la mitad de la luz de la pieza. Para cada viga el módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$ ) se obtuvo de acuerdo a (2):

$$E_{m,g} = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (2)$$

donde:  $a$  es la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo (mm),  $L$  es la luz de ensayo (mm),  $b$  y  $h$  son base y altura (mm) respectivamente,  $G$  es el módulo de elasticidad transversal, considerado como infinito;  $F_2 - F_1$  es el incremento de carga en la línea recta de regresión entre el 10% y 40% de la carga máxima estimada (N);  $w_2 - w_1$  es el incremento de deformación correspondiente a  $F_2 - F_1$  (mm).

Vale señalar que los ensayos de flexión fueron no destructivos, *i.e.*, realizados hasta lograr una carga máxima del 40% de la carga de rotura estimada. La carga máxima fue estimada previamente, a partir de diez vigas hasta la rotura. El módulo de elasticidad y la densidad se ajustaron al 12% de CH de acuerdo a EN 384 (AENOR 2011).

Los resultados de los ensayos destructivos de flexión de las diez vigas mencionadas en el párrafo anterior además de proveer información sobre la carga máxima, fueron luego comparados (al final de la Sección 4.3) con los resultados de los ensayos de flexión de las placas NLT



#### 4.2.2 Etapa II- Placas NLT

Dos series, cada una compuesta por 7 placas, fueron construidas a partir de las vigas, de aquí en adelante denominadas “láminas”, caracterizadas en la etapa I. La serie denominada PLE corresponde a placas compuestas en su totalidad por láminas enteras de 2850 mm de longitud, y la serie PLC a placas construidas alternando láminas enteras, y láminas cortadas en dos tramos de 1/3 (950 mm) y 2/3 (1900 mm) de la longitud de una lámina entera, colocadas a tope entre sí (“butt joint”).

Con el objetivo de generar un conjunto uniforme de placas NLT con propiedades estructurales similares, se tomó especial precaución en la selección de láminas (i.e., de diferentes rangos de propiedades elásticas y densidades) y en su ubicación (i.e., de acuerdo a un orden definido) dentro de cada placa. Así entonces, se clasificaron las tablas de acuerdo a su MOE en 4 subgrupos y se establecieron criterios, tanto para distribuir las láminas en las diferentes placas como para ordenarlas dentro de éstas. De este modo cada placa estaba conformada por 3 láminas del grupo de menor rango de MOE (posición 2, 8 y 4), 3 del segundo grupo (pos. 1, 9 y 6), 2 del tercero (pos. 7 y 3) y 1 del grupo de mayor MOE (pos. 5). (Ver Figura 30).



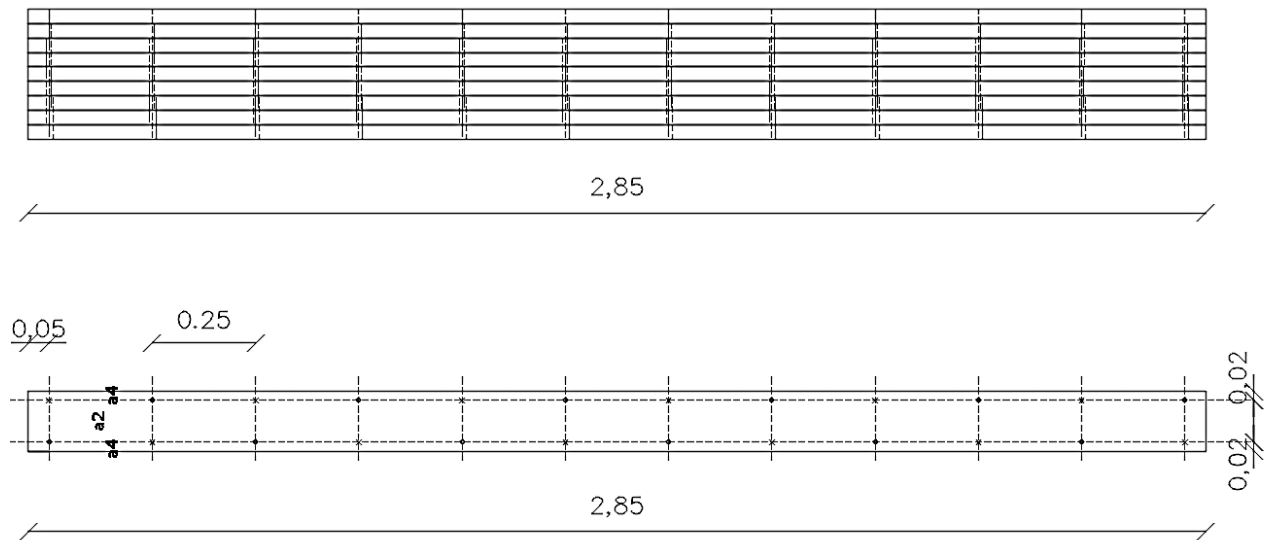
Figura 30. Distribución de láminas dentro de cada placa según MOE.

Los MOE de cada subgrupo cubrían los siguientes rangos: Subg. 1, 2682-3592 N/mm<sup>2</sup>; Subg. 2, 3636-4593 N/mm<sup>2</sup>; Subg. 3, 4611-5573 N/mm<sup>2</sup>; Subg. 4, 5707-7914 N/mm<sup>2</sup>.

#### 4.2.2.1 Fabricación de las placas

Las láminas fueron unidas mediante clavos espiralados de acero de 3,1 mm de diámetro y 100 mm de longitud de forma tal que cada clavo atravesó casi completamente tres tablas. Los clavos fueron colocados con clavadora neumática (marca Apach) y en zigzag de acuerdo al patrón de clavado indicado en la Figura 30 (a y b). Este patrón fue definido siguiendo las especificaciones definidas en la guía canadiense de construcción de NLT (2017), en las que se recomiendan distanciamientos mínimos que dependen del ancho de las láminas y los diámetros de los clavos.

##### a) PLA



##### b) PLC

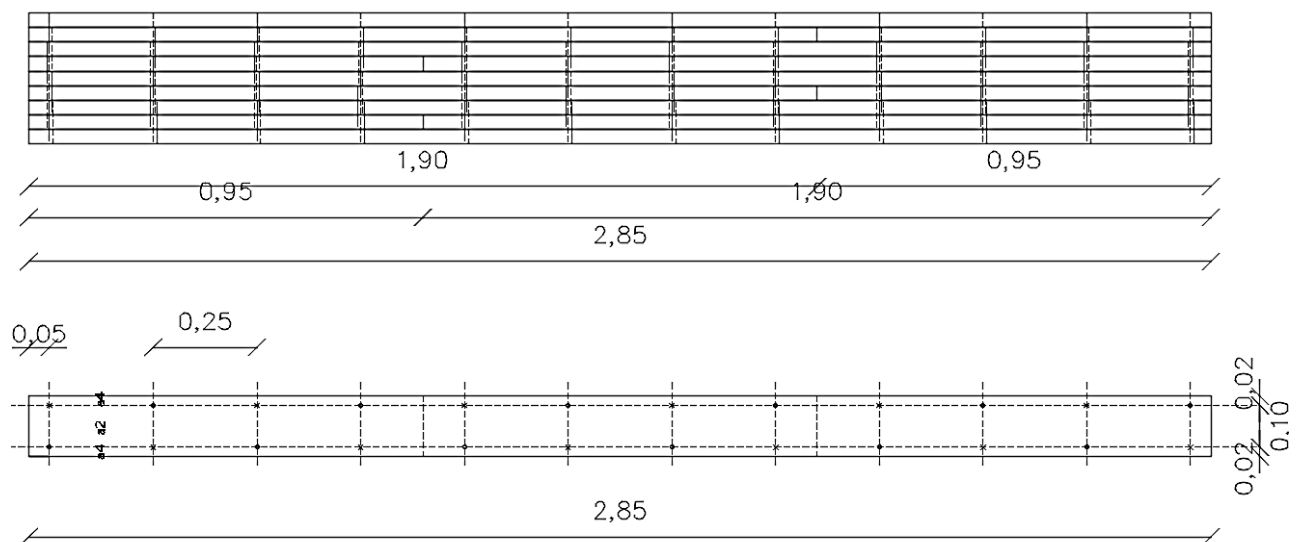


Figura 31. Conformación de placas NLT. a) PLE; b) PLC (planta y vista frontal)



Figura 32 Características constructivas de los paneles y su armado. a) Clavado de la última lámina; b) detalle de juntas a tope ("Butt joints"); c) placas.

#### 4.2.2.2 Ensayos de flexión de 4 puntos

Luego de construidas, todas las placas NLT fueron ensayadas a flexión estática en cuatro puntos de acuerdo a EN 408 (AENOR 2016), con la disposición de la placa simplemente apoyada y la aplicación de dos cargas en los extremos del tercio central con un avance constante del cabezal de cargas a una velocidad adecuada para alcanzar la rotura en un tiempo comprendido entre 180 y 420 segundos. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Materiales y Productos forestales del Laboratorio tecnológico del Uruguay (LATU). El registro de las deformaciones se realizó mediante la utilización de un extensómetro marca Mitutoyo, ubicado en la cara inferior de la placa y en la mitad de la luz de la pieza, hasta alcanzar una carga igual al 40% de la carga máxima estimada, asegurando así el registro del ciclo de carga y su correspondiente deformación dentro del período elástico. Luego de ello, este fue retirado y se continuó con el ensayo aplicando la carga a la misma velocidad hasta llegar a la rotura de la placa (Ver Figura 34 y 34).

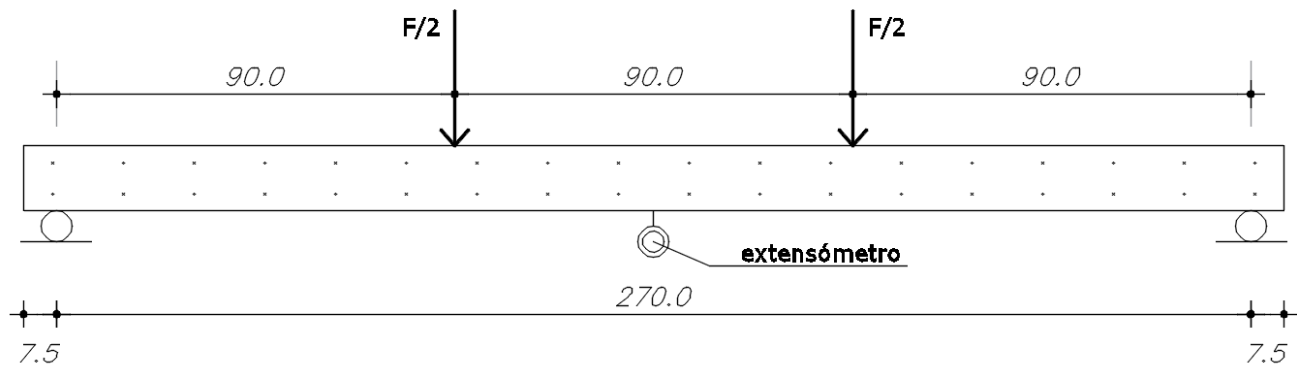


Figura 33 Esquema de ensayo.



Figura 34 Configuración del ensayo a flexión de las placas de tamaño estructural

Para cada placa NLT, se obtuvieron los valores de módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$ ) y la resistencia de flexión ( $f_m$ ), de acuerdo a (3) y (4) respectivamente:

$$E_{m,g} = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb} \right)} \quad (3)$$

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (4)$$

donde: a es la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo (mm), L es la luz de ensayo (mm), b y h son base y altura (mm) respectivamente, G es el módulo de elasticidad transversal, considerado como infinito;  $F_2 - F_1$  es el incremento de carga en la línea recta de regresión entre el 10% y

40% de la carga máxima estimada (N);  $w_2-w_1$  es el incremento de deformación correspondiente a F2-F1 (mm).

El módulo de elasticidad y la densidad se ajustaron al 12% de CH de acuerdo a EN 384 (AENOR 2011).

#### 4.2.2.3 Procesamiento de datos y análisis estadístico.

Luego de finalizadas las tareas de laboratorio, los datos fueron ordenados y analizados estadísticamente. Primero se realizó un análisis estadístico descriptivo y luego Análisis de Varianza (ANOVA).

### 4.3 Presentación y discusión de los resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir del programa experimental llevados a cabo en estructuras de tamaño real.

#### 4.3.1 Etapa I – Vigas de madera

##### 4.3.1.1 Propiedades de la madera utilizada.

Los valores promedio de CH, densidad y módulo de elasticidad (MOE) de las vigas fueron 12,1 %, 419 kg/m<sup>3</sup> y 5015 N/mm<sup>2</sup>, respectivamente.

Los valores de MOE de las tablas utilizadas variaban entre 3137 y 9256 N/mm<sup>2</sup> y los de densidad entre 330 y 494 Kg/m<sup>3</sup>. El siguiente cuadro muestra la relación entre MOE y densidad en cada lámina, (ver Figura 35).

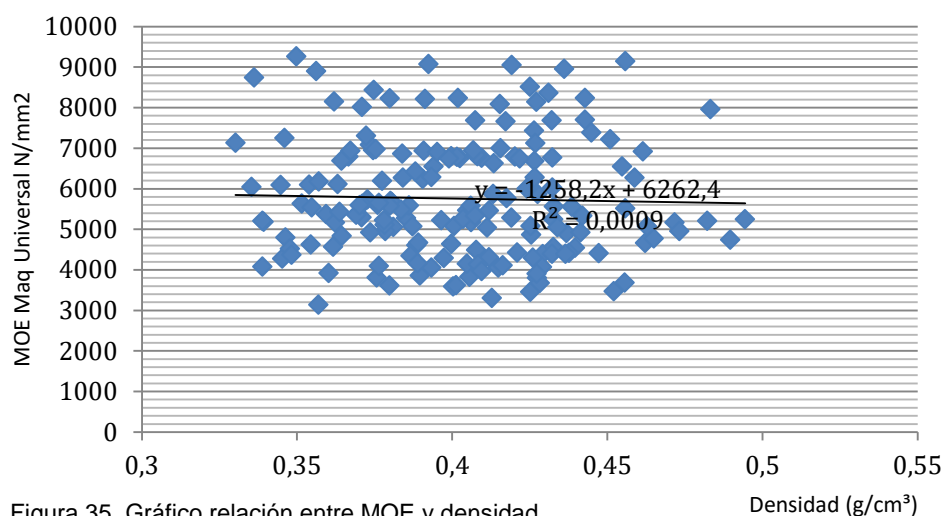


Figura 35. Gráfico relación entre MOE y densidad.

El análisis de variabilidad ocurrida tanto en el MOE como en la densidad llevado a cabo en los 14 grupos de tablas que conforman las placas NLT indicó que no había una diferencia significativa ( $\alpha < 0.05$ ) en estos valores, lo que sugiere que la diferencia en la madera utilizada en cada panel es mínima y por tanto irrelevante para los ensayos. Ver Tabla 5

Tabla 5. Valores medios de MOE y densidad de las láminas que componen cada placa. a) placas PLE, b) placas PLC

		a) PLACAS PLE						
		Placa 04	Placa 12	Placa 07	Placa 02	Placa 06	Placa 11	Placa 01
MOE prom (N/mm <sup>2</sup> )		<b>4092</b>	<b>4619</b>	<b>4236</b>	<b>3950</b>	<b>4204</b>	<b>4556</b>	<b>3349</b>
Dens prom (g/cm <sup>3</sup> )		0,416	0,379	0,412	0,424	0,405	0,429	0,361

		b) PLACAS PLC						
		Placa 13	Placa 14	Placa 08	Placa 10	Placa 03	Placa 09	Placa 05
MOE prom (N/mm <sup>2</sup> )		<b>4665</b>	<b>4724</b>	<b>4279</b>	<b>4491</b>	<b>4015</b>	<b>4439</b>	<b>4150</b>
Dens prom (g/cm <sup>3</sup> )		0,407	0,438	0,404	0,426	0,428	0,425	0,430

### 4.3.2 Etapa II- Placas NLT

#### 4.3.2.1 Resultados de los ensayos de flexión.

Se realizaron gráficos carga-deformación para comprender el comportamiento mecánico de las vigas y poder caracterizar comparativamente el MOE y MOR de las placas. La resistencia de cada una de ellas se calculó a partir de la carga máxima registrada, mientras que para el MOE se utilizó la pendiente de cada grafica en el tramo comprendido entre el 10% y el 40% de la carga máxima.

Las curvas de carga-deflexión de todos los paneles, según la serie a la que correspondan, se exhiben en la Figura 36.

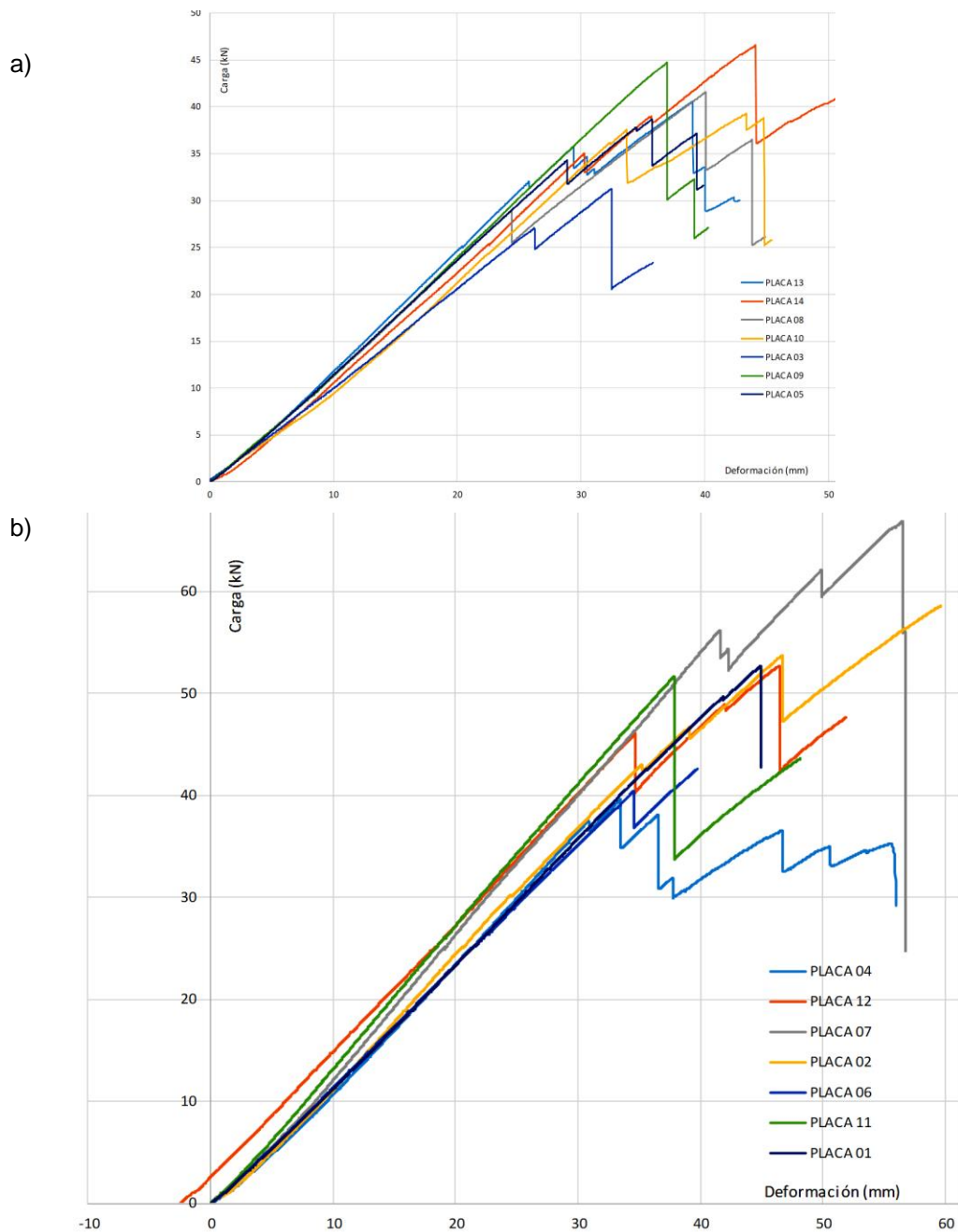


Figura 36. Ensayo de placas NLT. Gráficos carga desplazamiento. a) placas PLC, b) placas PLE

Analizando las curvas carga-deformación y los registros fotográficos, puede constatarse que transcurridos los primeros momentos del ciclo de carga (en el entorno del 5%), donde se aprecia un mayor desplazamiento ante igual ciclo de carga, la respuesta del panel se estabilizó. Observando las marcas dejadas en los paneles luego del ensayo, pueden constatarse pequeños aplastamientos en los puntos de contacto de los cabezales de carga y de apoyo y la superficie de la madera. Posiblemente esto, junto con el trabajo de las uniones clavadas, haya contribuido a mejorar la distribución de cargas entre los paneles.

Luego de esto, todas ellas muestran un comportamiento lineal, elástico, hasta que aparece la primera rotura en una de las tablas. A partir de ese punto se registran caídas abruptas, sucesivas (producto probablemente de roturas parciales o totales de alguna de las tablas), siempre seguidas por una recuperación también lineal ante el ciclo de carga, lo que indica que la respuesta del panel continúa siendo elástica.

Lo anterior es consistente con estudios llevados a cabo por Tannert (2002), quien, basándose en los trabajos de investigación llevados a cabo por Haller y Pannke (1998) afirma que los paneles entablados clavados muestran un comportamiento completamente elástico hasta su rotura.

Los resultados muestran también una variación importante en la rigidez entre los paneles del grupo PLE y los del PLC. En ese sentido, puede verse que los primeros, ante igual carga, presentaron deformaciones de magnitudes cercanas a la mitad de las presentadas por los segundos. Por otra parte, sólo una placa del grupo PLC (Placa 14) tuvo un comportamiento resistente superior a sus iguales, acercándose a valores de los de láminas enteras, tanto en MOE como en deformación. Una posible causa de este aumento resistente frente a sus iguales es que, en promedio, está conformada por láminas de densidades mayores.

En cuanto a las cargas máximas soportadas, las placas del grupo PLE fueron, promedialmente, un 30% más resistentes que los compuestos con tablas unidas a tope.

Todas las placas del grupo PLE superaron el 80% de su carga máxima antes de que se produjera la primer caída producto de la rotura de alguna de sus tablas, excepto el panel N° 2, que experimentó pequeños “cracks” muy poco significativos a partir del 73%. Las placas del otro grupo (PLC) no presentaron un comportamiento uniforme en este sentido, por lo que no puede hablarse de la existencia de un patrón común. (ver Tabla 6 a) y b))

Tabla 6. Resultados de los ensayos de carga y deformación.

La tabla incluye los registrados para cada placa al momento de producirse la primera rotura (1er Crack) y al momento de alcanzar su carga máxima. También se expresan las diferencias entre estos valores y la relación porcentual entre los valores registrados en estos 2 momentos

a) PLACAS PLE

	Placa 04		Placa 12		Placa 07		Placa 02		Placa 06		Placa 11		Placa 01	
	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)
C. 1erCrack	36,93	31,23	45,5	34,2	54,25	42,17	45,5	34,2	40,37	34,52	51,68	37,85	49,62	42,1
C. máx	39,7	33,47	52,8	46,43	66,93	56,47	58,62	59,6	42,62	39,77	51,68	37,85	52,75	44,92
Dif.	2,77	2,24	7,3	12,23	12,68	14,3	13,12	25,4	2,25	5,25	0	0	3,13	2,82
% variac	7,0%	6,7%	13,8%	26,3%	18,9%	25,3%	22,4%	42,6%	5,3%	13,2%	0,0%	0,0%	5,9%	6,3%



b) PLACAS PLC

	Placa 13		Placa 14		Placa 08		Placa 10		Placa 03		Placa 09		Placa 05	
	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)	Carga (KN)	Desplazam (mm)
C1erCrack	31,31	25,84	34,87	31,34	28,56	24,11	37,31	33,51	26,56	25,78	44,56	36,86	33,87	28,9
C. máx	40,56	39,02	46,56	44,11	41,56	40,08	39,25	43,36	31,25	32,47	44,62	36,97	38,68	35,76
Dif.	9,25	13,18	11,69	12,77	13	15,97	1,94	9,85	4,69	6,69	0,06	0,11	4,81	6,86
% variac.	22,8%	33,8%	25,1%	29,0%	31,3%	39,8%	4,9%	22,7%	15,0%	20,6%	0,1%	0,3%	12,4%	19,2%

4.3.2.2 Módulo de elasticidad.

En la Figura 37 se muestran los módulos de elasticidad de cada una de las placas ensayadas. El análisis de varianza ( $\alpha < 0.05$ ) realizado para rechazar la hipótesis nula, mostró que existe diferencia significativa entre los valores medios de MOE de PLE y PLC. Como fue mencionado anteriormente, los valores de MOE de las placas conformadas por tablas enteras (PLE), superan por más del doble a las del grupo PLC. Esto es consistente con estudios anteriores, como los efectuados por Ogunrinde (2019), quien ante ensayos similares demostró que las placas conformadas por láminas enteras tienen mayor rigidez a la flexión que las compuestas por láminas cortadas. Pero en su estudio concluye que esa relación es del orden del 40% a favor de las enteras. La diferencia con nuestro caso radica en la forma en que fueron conformadas las placas ya que, en su estudio, se intercalaban cortadas y enteras en una relación 5 a 2 (28.6%) mientras que en este trabajo la relación es 5 a 4 (55.6%), o sea, cercana al doble. Por otra parte, Ma (2019), revisando trabajos anteriores (Williams et al., 1994), menciona que las diferencias en resistencia y rigidez entre paneles con y sin uniones a tope pueden variar entre 60% y 75% respectivamente.

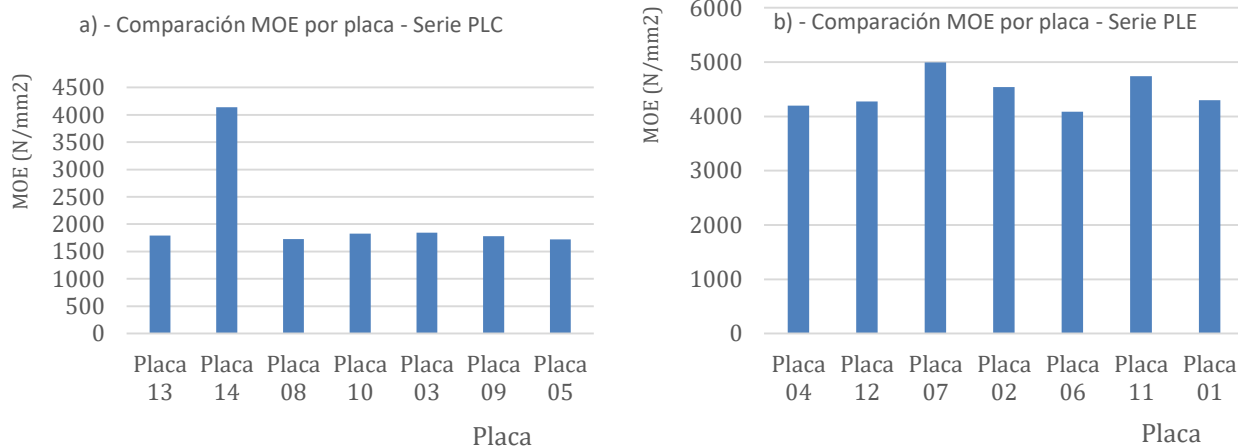


Figura 37. MOE placas. a) serie PLC, b) serie PLE

Por otra parte, analizados los resultados de los ensayos se pudo constatar que no existen grandes diferencias en cuanto a los valores de MOE global de las placas PLE y los propios del MOE promedio de las láminas que los conforman. Como se mencionó en el capítulo anterior, las láminas fueron distribuidas en las placas de modo de que el valor promedio de MOE de las placas fuera similar. (ver Tabla 7).

Tabla 7. Cuadro comparativo valores MOE promedio de las láminas que conforman las placas y valores MOE de cada placa de la serie PLE.

PLACAS PLE							
	Placa 04	Placa 12	Placa 07	Placa 02	Placa 06	Placa 11	Placa 01
MOE láminas prom	<b>4092</b>	<b>4619</b>	<b>4236</b>	<b>3950</b>	<b>4204</b>	<b>4556</b>	<b>3349</b>
MOE exp	<b>4197</b>	<b>4274</b>	<b>4993</b>	<b>4540</b>	<b>4084</b>	<b>4738</b>	<b>4300</b>
Rel. MOE lam/MOE placas	2,56%	-7,46%	17,88%	14,94%	-2,85%	3,99%	28,40%

En general, los valores de MOE de las placas resultaron cercanos o un poco mayores a los del promedio de las láminas que lo componen, a excepción de la placa 01 que presenta un MOE sustantivamente mayor. Esto es consistente con los estudios realizados por Ogunrinde (2019), quien, en sintonía con estudios anteriores Wolfe (1979), afirma que, aunque la rigidez y el módulo de elasticidad de las placas no aumentan demasiado, la conformación de las placas ayuda a reducir la variación de las de la madera que compone las láminas. Por otra parte, para el caso de las placas PLC, los valores de MOE fueron significativamente menores (en el entorno del 60%) que el valor promedio del conjunto de láminas que conforman cada panel. (Ver Tabla 8)

Tabla 8. Cuadro comparativo valores MOE promedio de las láminas que conforman las placas y valores MOE de cada placa de la serie PL.

PLACAS PLC							
	Placa 13	Placa 14	Placa 08	Placa 10	Placa 03	Placa 09	Placa 05
MOE laminas prom	<b>4665</b>	<b>4724</b>	<b>4279</b>	<b>4491</b>	<b>4015</b>	<b>4439</b>	<b>4150</b>
MOE exp	<b>1795</b>	<b>4138</b>	<b>1728</b>	<b>1825</b>	<b>1846</b>	<b>1778</b>	<b>1721</b>
Rel. MOE lam/MOE placas	-61,53%	-12,39%	-59,61%	-59,36%	-54,04%	-59,96%	-58,53%

Si se considera que 4 de las láminas que los componen no colaboran por sí mismas para soportar los esfuerzos de flexión, este es un decrecimiento esperado. Por otra parte, como en el grupo anterior, en este existe un solo caso (placa 14) que muestra un comportamiento elástico muy superior a los demás del grupo. En un análisis posterior no pudieron detectarse motivos para que se haya registrado esta diferencia.

#### 4.3.2.3 Carga máxima y módulo de rotura (MOR).

Cada panel fue ensayado hasta alcanzar la carga máxima y su consecuente rotura, habiéndose registrado previamente los datos de carga–deformación correspondientes al período elástico, descritos en el apartado anterior. Los resultados de carga máxima y MOR para cada panel se muestran en la Tabla 9. El correspondiente módulo de rotura (MOR) fue calculado en base a los valores de carga máxima allí registrados. La deformación registrada en el primer colapso o rotura parcial y al alcanzar la carga final también fueron registradas, de modo de conocer el grado de deformación entre estos 2 momentos. Ver Tabla 6 (más arriba).

Tabla 9. Carga máxima y MOR de cada placa. a) serie PLE, b) serie PLC

		a) PLACAS PLE							
		Placa 04	Placa 12	Placa 07	Placa 02	Placa 06	Placa 11	Placa 01	Prom
F Máx (KN)		<b>39,70</b>	<b>52,80</b>	<b>66,93</b>	<b>58,62</b>	<b>42,62</b>	<b>51,68</b>	<b>52,75</b>	<b>52,16</b>
MOR (N/mm <sup>2</sup> )		<b>15,65</b>	<b>20,81</b>	<b>26,38</b>	<b>23,10</b>	<b>16,80</b>	<b>20,37</b>	<b>20,79</b>	<b>20,55</b>

		b) PLACAS PLC							
		Placa 13	Placa 14	Placa 08	Placa 10	Placa 03	Placa 09	Placa 05	Prom
F Máx (KN)		<b>40,56</b>	<b>46,56</b>	<b>41,56</b>	<b>39,25</b>	<b>31,25</b>	<b>44,62</b>	<b>38,68</b>	<b>40,35</b>
MOR (N/mm <sup>2</sup> )		<b>15,98</b>	<b>18,35</b>	<b>16,38</b>	<b>15,47</b>	<b>12,32</b>	<b>17,58</b>	<b>15,24</b>	<b>15,90</b>

Las cargas máximas alcanzadas en las placas conformadas por láminas enteras (PLE) fueron promedialmente un 30 % superiores a las de las placas PLC. Lo mismo se registra al comparar sus valores de MOR. De todos modos, al comprar la carga de rotura de cada uno de los paneles de los 2 grupos notamos una gama más amplia de valores para los que, debido a la reducida cantidad de muestras, no fue posible establecer una relación entre sus propiedades mecánicas.

Si analizamos los valores para cada uno de los grupos, podemos notar que en el de las PLE, una de las placas (Placa 07) alcanzó un valor de carga máxima muy superior a los demás (en el orden del 28 % sobre el promedio) y que 2 de ellos (placas 04 y 06) presentaron valores relativamente bajos (en el orden del 30 % sobre el promedio), presentando un COV de 16.3%.

Por otra parte, los valores presentados en el otro grupo (PLC) presentan un COV sensiblemente menor (11.3%), ya que casi la totalidad de los paneles que componen este grupo presentan valores relativamente similares, salvo el panel 03 que apenas alcanzó un valor de rotura 30 % inferior al promedio.

Si analizamos la relación entre el primer colapso, debido en general a la rotura de una o más láminas y el momento en que la placa alcanza la carga máxima de rotura, notamos un comportamiento dispar entre las diferentes placas que componen cada serie (ver Tabla 5). A pesar de ello, si se considera globalmente el comportamiento de cada grupo, pueden notarse algunos aspectos particulares:

La diferencia entre el registro de la primera rotura y la carga final, tanto en su valor de carga aplicada como en desplazamiento, es mayor en el grupo PLC que en el PLE.

El primer colapso se produce más tempranamente en las placas PLC que en las PLE.

Ambos fenómenos pueden explicarse por los modos de falla de cada tipo de placa (que serán estudiados en el próximo capítulo) y la presencia de láminas discontinuas en las placas del grupo PLC.

No se constataron durante los ensayos colapsos primarios producidos en las uniones a tope de las láminas, pero es conocido que éstas colaboran de menor manera en la resistencia general del panel a la flexión, por lo que es posible suponer que la rotura de una de las láminas enteras sea más relevante para la integridad de la placa.

Finalmente, se compararon los valores medios de MOR de las placas de la serie PLE con los de las 10 láminas ensayadas al inicio hasta la rotura. La serie PLE presentó un valor medio de 20.55 N/mm<sup>2</sup> y las tablas un valor medio de 28.38 N/mm<sup>2</sup>. Estos valores muestran una reducción importante en las placas, producto, probablemente, de la incidencia en el conjunto de los defectos presentes en las láminas y de la presencia de láminas con densidad y resistencia menores.

#### 4.3.2.4 Influencia de la presencia de las juntas a tope

Como fue mencionado anteriormente las placas conformados por láminas discontinuas (PLC) presentan menores valores de primera rotura, carga máxima, MOR y MOE que los conformados por láminas enteras.

Estudios anteriores, como el llevado adelante por Ogunrinde (2019) y Williams (1994), y los propuestos en el Canadian Standard Association (CSA) de Canadá (2014), respaldan estas afirmaciones. De todos modos, los porcentajes de variación entre ambos tipos de placas encontrados en esos estudios y los resultantes de los ensayos llevados a cabo en esta tesis presentan diferencias. Estas diferencias se basan, principalmente, en la configuración las placas. Como se mencionó anteriormente las placas utilizadas en este estudio contienen una mayor cantidad de láminas enteras que los ensayados en los trabajos referenciados, favoreciendo la resistencia del panel ante esfuerzos de flexión. Para poder tener una idea mas clara de la influencia de la presencia de láminas cortadas deberían realizarse comparaciones entre diferentes tipos de configuraciones, objetivo que esta fuera del alcance de este trabajo pero que podría ser un tema de estudio para futuros.

Por otra parte, estudios anteriores Ogunrinde (2019), Ma (2020), incorporados al NBC de Canadá sugieren la colocación de clavos de refuerzo o platinas metálicas en las uniones a tope de las láminas de modo de aumentar la resistencia de la placa. También este punto podría formar parte de futuras investigaciones.

#### 4.3.2.5 Modos de falla

A continuación, puede verse una de las vigas durante su ensayo, próxima a alcanzar su carga máxima de rotura, y junto a ella una imagen de su estado luego de producirse ésta. (Figura 38 y Figura 39).



Figura 38. Placa durante el ensayo.



Figura 39. Placa luego de alcanzar la rotura.

La placa alcanzó la falla (luego de experimentar una deformación muy importante) por una combinación de esfuerzos de tracción y compresión en cada una de las láminas.

La falla de una placa por esfuerzos de flexión es clasificada como crítica, ya que puede conducir a la falla individual de ese elemento estructural y expandirse a toda la estructura. En toda la sección del elemento estructural se producen fatigas -tanto por tracción longitudinal como por compresión- que conducen a una rotura frágil del mismo debido, principalmente, a la rotura de las fibras de la madera. Como consecuencia de la presencia de defectos en la tabla, como por ejemplo nudos, la resistencia a la tracción se ve reducida significativamente en comparación a su resistencia a la compresión que no es afectada por este tipo de defectos. (Ogunride, 2019).

Por lo tanto, las fallas por tracción, tal como se manifestaron en los ensayos, se producen mayormente por roturas frágiles ubicadas en las zonas traccionadas de las diferentes placas.

El tipo de falla más comúnmente encontrado en este estudio es la presencia de roturas longitudinales en la dirección de las fibras, que pueden haber sido causadas por fatiga de la madera al ser sometida a los esfuerzos de flexión. Estas roturas parecen haber sido causadas, en la mayoría de los casos, por la presencia de defectos en la madera tales como nudos, desviaciones de las fibras o presencia de médula.

Por lo dicho, la cantidad y distribución de las fallas depende altamente de la cantidad y tipo de defectos con los que cuenta cada tabla, por lo que es imposible establecer un patrón de comportamiento común.

En las siguientes imágenes se ilustran algunas de las diferentes formas de rotura encontradas. Ver Figura 40 y Figura 41. Por la conformación de las placas fue imposible ver y analizar cada una de las láminas que las componen, por tanto las ilustraciones y comentarios se basan en las roturas visualizadas en las tablas de las caras externas y algunas de las centrales en las que los nudos eran visibles en su cara inferior.



Figura 40. Diferentes modos de rotura de las placas.a) desviación de las fibras, b) y e) presencia de nudo + desviación de las fibras, c) y d), presencia de nudos.



Figura 41. Diferentes modos de rotura de las placas. a) presencia de nudo b) desviación de las fibras, c) varios, d) presencia de nudo + desviación de las fibras, e) rotura de fibras sin presencia de defectos y f), presencia de médula + nudos.



En cuanto a la ubicación de las fallas, la mayor parte de ellas se ubican en el tercio central de la placa, entre los 2 puntos de aplicación de cargas. En algunos pocos casos estas fallas se produjeron entre los sectores de aplicación de las cargas y los apoyos. En el origen de estas fallas se constató la presencia de zonas nudosas o nudosidades y grandes desviaciones de las fibras, todas ellas ubicadas en las zonas cercanas al borde inferior de las tablas, interrumpiendo las fibras traccionadas.

En la mayor parte de las roturas, su propagación se produjo en el sentido de las fibras, no constatándose casos en que siguieran las líneas de clavado. También se constataron desvíos en la propagación de las roturas ante la presencia de zonas nudosas o médulas.

Las roturas constatadas fueron en todos los casos de tipo “frágil” en las que las fibras soportan las cargas hasta alcanzar su capacidad máxima y colapsan en un sector localizado de la tabla, con o sin propagación de la falla.

De todos modos, en consonancia con lo expuesto en estudios anteriores (Ogunrinde, 2019) puede decirse que al tratarse de un material constituido por laminas clavadas que comparten sus esfuerzos, este tipo de vínculo *convierte una matriz frágil en un material dúctil*. Esto actúa como un atenuador de fallas producidas por la tracción, que a su vez permite que las láminas tengan capacidad de reserva después de producida la primera fisura en sus fibras, tal como indican las gráficas de carga–desplazamiento.

Por otra parte, cabe resaltar también que no se detectó ningún indicador que muestre procesos de extracción o desplazamiento de los clavos.

Tampoco se registraron diferencias en los modos de rotura entre los paneles conformados por láminas enteras y los compuestos por láminas unidas a tope. Solamente se registraron algunos deslizamientos entre los extremos de las tablas que se unen a tope que siguieron el sentido de la deformación por flexión de la placa, pero en ningún caso puede identificarse este fenómeno como el provocador de la falla.

En síntesis, los modos de falla de ambos tipos de paneles se debieron a fallas por tracción, debido mayormente a desviaciones de las fibras muy pronunciadas y a desviaciones debidas a la presencia de nudos o zonas nudosas.

## **4.4 Conclusiones**

Los resultados de este trabajo permiten establecer las siguientes conclusiones

El comportamiento de las placas NLT ante la aplicación de cargas hasta el momento de la rotura es completamente elástico.

Los valores de MOE de las placas conformadas por láminas enteras (PLE), superan por más del doble a los de las conformados por láminas unidas a tope intercaladas con enteras (PLC).

Los valores de MOE de las placas PLE son cercanos o superiores a los del promedio de los de las láminas que las componen, por lo que puede afirmarse que las uniones clavadas colaboran en el trabajo conjunto de las láminas y mejoran la rigidez de la placa.

Los valores de MOR de las placas conformadas por láminas enteras fueron promedialmente un 30 % superiores a las de las conformadas por láminas unidas a tope intercaladas con enteras. Lo mismo sucedió con las cargas máximas soportadas.

Los modos de rotura detectados en las placas se debieron a fallas por tracción, originados mayormente por desviaciones de las fibras muy pronunciadas y por desviaciones debidas a la presencia de nudos o zonas nudosas.

Las uniones a tope de las láminas no fueron causa de las fallas en las placas, pero colaboraron al debilitamiento de su resistencia.

### **4.4.1 Recomendaciones para potenciales trabajos futuros:**

Efectuar estudios comparativos entre placas conformadas por láminas de madera pertenecientes al mismo grupo de calidad estructural y comparar su comportamiento elástico y resistente.

Evaluar las vibraciones en las placas NLT.

Realizar estudios de placas conformadas por tablas cortadas de diferentes configuraciones.

Realizar estudios sobre placas compuestas NLT y carpeta de hormigón.

|

## **5 Uso de placas laminadas clavadas (NLT) en viviendas cooperativas construidas por el sistema de ayuda mutua.**

### **5.1 Resumen**

El sistema cooperativo para la construcción de viviendas de interés social en Uruguay, en particular el sistema por ayuda mutua, ha demostrado ser altamente efectivo a la hora de alcanzar el objetivo de ofrecer vivienda digna para sus habitantes. Más de cincuenta años de existencia y de 40000 viviendas construidas en este régimen, dan cuenta de ello. Uno de los elementos distintivos de esta modalidad es que los futuros habitantes aportan su mano de obra en la construcción del conjunto cooperativo. Diversos motivos, relacionados con el multiempleo y la creciente atomización de los núcleos familiares, dificultan cada vez más su participación en el proceso constructivo, dominado mayoritariamente por sistemas constructivos tradicionales en albañilería y obra húmeda, donde es necesaria una alta participación de mano de obra contratada especializada en ello. El costo de esta mano de obra suele ser muy elevado y de productividad media o baja, por lo que en los últimos tiempos se vienen desarrollando diferentes estrategias para atenuar este problema, la más reciente apunta a incorporar sistemas constructivos prefabricados para la realización de toda la obra, donde los tiempos de fabricación a pie de obra se vean reducidos y se optimicen la participación de los futuros usuarios en el proceso constructivo. Desde el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOT) se han dado los primeros pasos para incorporar sistemas constructivos “no tradicionales” (SCNT) en la construcción de vivienda social, que impliquen un alto porcentaje de elementos prefabricados, industrializados o no, de modo de ampliar el espectro de posibilidades constructivas, bajar tiempos de obra y reducir costos sin disminuir calidad. Vista la disponibilidad de madera aserrada en Uruguay, un sistema constructivo basado en placas de madera laminada clavada (NLT) resulta sumamente apropiado para estos fines, ya que estas placas pueden ser producidas en las dimensiones habituales para este tipo de viviendas, de modo tal que su fabricación y/o manipulación permita la participación de mano de obra no especializada. En este trabajo se analizó la factibilidad de incorporar mano de obra no calificada en la construcción de paneles NLT, focalizando en aspectos de facilidad y tiempo de armado, manipulación y montaje, seguridad e higiene laboral. Adicionalmente se estudió también la capacidad portante de las placas.

Palabras clave: Cooperativas de viviendas, viviendas de interés social, ayuda mutua, sistemas constructivos prefabricados, madera laminada clavada (NLT).

## 5.2 Introducción

El sistema cooperativo para la construcción de viviendas de interés social en Uruguay, en particular el sistema por “Ayuda mutua”, ha sido clave en la política de viviendas dirigidas a sectores de nivel socioeconómico medio y medio-bajo, demostrando ser a través de cinco décadas la herramienta más eficaz y poderosa con que cuentan la ciudadanía y el Estado para asegurar el acceso de la población a una vivienda digna a familias de nivel socioeconómico medio y medio-bajo. Muestra de ello es que, hasta mediados de 2021, a pesar de varios años de baja o nula construcción, se llevaban construidas por esta modalidad unas 40.000 viviendas.

El sistema de “Ayuda mutua” implica básicamente que los integrantes de la cooperativa intervengan activamente en el proceso de gestión y construcción del conjunto habitacional aportando, entre otras cosas, su mano de obra en la ejecución de las viviendas. Según lo define la Ley N° 18407 (Sistema Cooperativo) en su artículo 124, *“La ayuda mutua es el trabajo comunitario adoptado por los socios para la construcción de los conjuntos colectivos...”*. Como esa mano de obra es mayoritariamente inexperta en tecnologías de construcción, en general se la utiliza para la realización de tareas poco calificadas, de asistencia a la mano de obra contratada que posee la calificación para la realización de las diferentes tareas implicadas en la construcción.

Actualmente, luego del tiempo transcurrido desde el comienzo del movimiento cooperativo, las motivaciones y necesidades que llevan a que un grupo de personas se organice con un fin común y su disposición a participar en el proceso, han variado significativamente. Las trabajadoras sociales Barrenechea, Berriel y Cirino, en su artículo “Ayuda mutua como sistema vigente”, comentan que *“Hoy, nos encontramos frente a grupos ampliamente heterogéneos, con integrantes provenientes de diferentes trayectorias socio-económicas, la mayoría de los cuales no cuentan con experiencia en construcción y en algunos casos presentan bajos niveles educativos...”* *“En lo que refiere al grupo, el mismo tiene como interés común la solución de la vivienda por esta vía, provocando poca identidad grupal. A su vez las experiencias individuales ligadas al concepto de Ayuda Mutua son varias, encontrándose un perfil de la población asalariada con lógica de trabajo vertical, que no tienen una cultura emprendedora y se resisten al emprendedurismo”*. De lo anterior se desprende que el interés y la disposición de *tiempo* de los cooperativistas para dedicar horas semanales al trabajo en obra han disminuido sensiblemente y a la par de ello también se ha visto afectada su *productividad*. Ambos factores han motivado alteraciones importantes en la esencia del sistema, constatándose, entre otras cosas, un aumento importante en la cantidad de horas de mano de obra contratada. Barrenechea, Berriel y Cirino (2015), atribuyen también este fenómeno a aspectos vinculados con la conformación de los grupos familiares y los cambios en el mercado laboral, con situaciones habituales de multiempleo o la extensión de las jornadas laborales que dificultan la participación de los cooperativistas.

Al día de hoy, la mayor parte de los proyectos cooperativos son llevados adelante mediante la utilización de sistemas constructivos tradicionales (SCT), que en Uruguay involucra tecnologías y materiales de hormigón armado, acero, mampostería, etc, que requieren de una alta participación de mano de obra contratada especializada en ello. El costo de esta mano de obra suele ser muy elevado y de productividad media o baja, por lo que en los últimos años se vienen desarrollando diferentes estrategias para atenuar este problema. Una de ellas es la capacitación de algunos cooperativistas que demuestren habilidades para el desarrollo de algunas de las tareas de compleja ejecución. Otra es la incorporación de elementos constructivos de obra seca apropiados para ser ejecutados por los cooperativistas con un mínimo de capacitación técnico-práctica (por ejemplo, Steel frame). La estrategia mas reciente apunta a incorporar sistemas constructivos prefabricados para la realización de toda la obra, donde los tiempos de fabricación a pie de obra se vean reducidos y se optimicen la participación de los futuros usuarios en el proceso constructivo.

### **5.2.1 Sistemas constructivos apropiados**

En ese sentido, pero persiguiendo otros objetivos (acortar los plazos de obra y abaratar los costos de construcción), desde el MVOT se han dado los primeros pasos para incorporar sistemas constructivos “no tradicionales” (SCNT) en la construcción de vivienda social, que impliquen un alto porcentaje de elementos prefabricados, industrializados o no, de modo de ampliar el espectro de posibilidades constructivas, bajar tiempos de obra y abaratar costos sin perder calidad. Para ello incorporó una serie de disposiciones y reglamentos que abren la puerta a estos sistemas, que están detalladas en el documento de “Estándares de desempeño y requisitos para la vivienda de interés social” (2011). Más recientemente, además, el MVOT promovió el “Reglamento para registro de sistemas constructivos no tradicionales” (2020), en el que define a los SCNT como aquellos sistemas *cuyos materiales, componentes y/o elementos constructivos son innovadores, y/o cuyo montaje o puesta en obra no se realiza con procedimientos establecidos en la construcción civil convencional*”.

Los sistemas presentados hasta el momento constituyen un avance importante hacia la concreción de los objetivos mencionados pero, de todos modos, en los procesos constructivos involucrados en ellos la participación de los usuarios en las diferentes etapas de la construcción de la cooperativa, tanto en la prefabricación como en la de montaje, sigue siendo baja. La construcción en madera, en cualquiera de los posibles sistemas constructivos en que sea usada, puede encuadrarse dentro de los requisitos dispuestos en este reglamento. A pesar de ello, ninguno de los sistemas presentados hasta el momento ante el MVOT utiliza la madera como material principal para su ejecución.

Vista la importancia adquirida y la disponibilidad de madera en nuestro país y considerando los factores antes mencionados, se entiende sumamente necesario el desarrollo de sistemas constructivos que utilicen mayoritariamente este material. En particular un sistema constructivo basado en placas de madera laminada clavada (NLT) para su empleo en entresijos, techos y paredes de edificaciones

residenciales, resulta sumamente apropiado para estos fines, ya que estas placas pueden ser producidas en las dimensiones habituales para este tipo de viviendas, de modo tal que su fabricación y/o manipulación permita la participación de mano de obra no especializada. En ese sentido, en este capítulo se revisan algunos aspectos importantes a considerar a la hora de evaluar las potencialidades de este sistema para ser usado con las condiciones y fines mencionados.

El objetivo planteado fue el de analizar si es posible emplear mano de obra no calificada para la construcción de los paneles según criterios de facilidad y tiempo de armado, transportabilidad, puesta en obra, seguridad e higiene laboral.

Adicionalmente se estudió también la capacidad portante de las placas.

### **5.3 Consideraciones generales**

Los paneles NLT consisten básicamente en la unión mecánica de un conjunto de tablas (láminas) para conformar un elemento estructural sólido. Estas láminas se colocan cara a cara y las uniones se realizan a través de clavos metálicos que se colocan utilizando una clavadora neumática.

Considerando las dimensiones habituales de las viviendas de interés social, cuyas medidas en metros cuadrados están limitadas según lo establecido en la Ley Nacional de Viviendas (1969) y teniendo en cuenta las dimensiones, particularmente el largo, de las piezas de madera serrada de origen nacional y disponibles en el mercado uruguayo, es razonable pensar en paneles para conformar los muros que no superen los 2,50m de alto y placas para conformar techos y entresijos que no superen los 3,00m de largo.

En cuanto al ancho de cada pieza, el factor más importante a considerar es su peso, de modo de que éstas puedan ser transportadas en horizontal entre 2 o 3 personas y elevadas en vertical mediante el uso de sistemas mecánicos simples, tales como guinches eléctricos o poleas de tracción "manual".

Para dimensionar entonces los paneles y placas deben tenerse en consideración dos factores: por una parte, la normativa de seguridad laboral e higiene vigente en nuestro país, donde se establece que un obrero no podrá cargar por sí mismo elementos físicos que superen los 25Kg y por otra, el peso de las láminas de madera y los clavos que conforman los paneles.

De acuerdo a los valores determinados en los ensayos, la densidad media de la madera utilizada es de 412 Kg/m<sup>3</sup>. Considerando los largos mencionados y que cada lámina tiene 145mm de ancho, podemos concluir que el ancho de la placa no debe superar los 280mm para ser transportada por 2 personas y 420mm para hacerlo entre tres.

## 5.4 Facilidad y tiempo de armado de los paneles

El instrumental necesario para el armado de los paneles fue: un elemento de soporte (caballete) que permita posicionar y mantener fijas las tablas para su clavado y una clavadora neumática.

El caballete se diseñó especialmente para poder disponer de manera apilada las láminas, una a una, para realizar su clavado. Ver Figura 42.



Figura 42. Caballete para armado de placas y paneles.

Este caballete cuenta con un plano de soporte que permite colocar las láminas a partir de una distancia de 45cm del suelo, de modo de que el operario no tenga que inclinarse de manera incómoda para realizar el clavado y que, al colocar la última lámina del panel, ésta no supere una altura mayor que su cintura, evitando así esfuerzos y posiciones incómodas durante el uso de la clavadora neumática. Cuenta también con una placa protectora de OSB dispuesta de modo que, ante cualquier desvío de un clavo hacia el cuerpo del operario, éste se encuentre siempre protegido.

El procedimiento de armado de cada panel o placa incluye los siguientes pasos:

- 1- Selección de las tablas. Se seleccionan las tablas de acuerdo al criterio que se establezca (grado estructural, por ejemplo). Para este estudio no fue considerado el grado estructural, pero si, se procuró eliminar toda tabla que presentara grandes alabeos o mostrara daños en su superficie (pérdidas de alguna arista o roturas de algún tipo).

- 2- Marcado del patrón de clavado. Se construyó una plantilla de cartón, que permitiera marcar con facilidad la posición de cada clavo.
- 3- Clavado de las láminas. Los clavos atravesaron 3 tablas, por lo que el clavado comienza a partir de la tercera tabla. Luego de completada la fijación de todas las láminas, la placa es dada vuelta para colocar los clavos adicionales correspondientes a las 3 primeras tablas.



a



b



c

Figura 43. Procedimiento de armado de las placas. a) selección de láminas, b) marcado del patrón de clavado, c) clavado de láminas con clavadora neumática.

Estas tareas pueden ser realizadas con facilidad por un solo operario, aunque de acuerdo a la cantidad de acciones y movimientos que implica cada paso, es recomendable que lo hagan 2. Una de ellas encargada de seleccionar y marcar y otra de clavar las láminas.

Para este estudio se cronometraron los tiempos de manufactura comparando entre mano de obra calificada (carpintero) y no calificada.

Los resultados mostraron que:

El marcado de cada placa insumió promedialmente 8 minutos.

El posicionado y clavado de las placas insumió entre 10 y 12 minutos para placas conformadas por tablas enteras y entre 12 y 14 minutos para las conformadas por tablas enteras y cortadas intercaladas.

No se constataron diferencias importantes en los tiempos de clavado entre mano de obra calificada y no calificada.

Un aspecto a considerar es que, debido al carácter anisotrópico de la madera y la presencia de zonas nudosas, en algunas ocasiones la penetración de los clavos no fue total. Esto requirió un ajuste manual posterior utilizando un martillo, que provocó un aumento en los tiempos e armado. Aunque el porcentaje



de casos en que esto sucede es menor (podría estimarse entre un 5% y un 8% del total de los clavos), su incidencia en los tiempos de confección es importante.

## **5.5 Facilidad de transporte y montaje en obra**

Como se indicó anteriormente, el traslado en obra de este tipo de paneles y placas puede realizarse con facilidad entre 2 o 3 operarios y su traslado en vertical mediante instrumentos mecánicos sencillos, como también su carga en vehículos.

Las placas construidas para este trabajo fueron de 315mm de ancho, por lo que su traslado en obra debería hacerse entre 3 personas.

Debido a su facilidad de manufactura, los paneles NLT pueden construirse tanto "a pie de obra" como en taller. Esta opción es especialmente apropiada para casos de obras en terrenos reducidos o en lugares donde las condiciones de almacenaje no son las adecuadas. En este caso, el transporte a obra se puede resolver de manera sencilla y económica mediante vehículos de carga de mediano tamaño, ya que su peso y dimensiones son aptas para ser cargadas por este tipo de vehículos.

El montaje de los paneles y placas en obra se realiza principalmente utilizando conectores metálicos (clavos y tornillos) que unen los elementos entre sí y a los demás elementos constructivos (soleras, vigas, dinteles, etc). No es el objetivo de este trabajo detallar el proceso de montaje, por lo tanto, no se especifican detalles de montaje. De todos modos el factor principal a considerar, como fue mencionado, es el peso de cada una de las piezas y las dificultades que presentan para el traslado y montaje debido a su forma y dimensiones.

Como consideración general debe tenerse en cuenta que en todo momento debe cumplirse con la normativa de seguridad laboral e higiene vigente en nuestro país, donde se establece que un obrero no podrá cargar por sí mismo elementos físicos que superen los 25Kg, por lo que debe procurarse que tanto en su traslado en horizontal, en vertical o en izados de montaje, el peso soportado por cada operario no supere este valor.

En los casos de izados de montaje es recomendable utilizar elementos mecánicos de apoyo (guinches o roldanas) y en caso de no contar con estos elementos se recomienda apoyarse en andamios o caballetes que permitan mantener uno de los extremos del panel apoyado, de modo de reducir la carga a mientras el panel es levantado desde el otro extremo.

Ninguna de estas operaciones presenta complejidades tales que impidan su realización por personas que no tengan experiencia en trabajos de obra. De todos modos, es importante la presencia de una persona calificada, con la formación y experiencia suficiente para supervisar la operativa.

## 5.6 Capacidad portante

El diseño de un entrepiso de construido con placas de NLT puede asimilarse al de un entramado ligero de madera, en el cual las vigas de madera están separadas a una distancia típica entre 40 y 60 cm, y unidas solidariamente con una placa estructural de tablero contrachapado (plywood) o virutas orientadas (OSB). La resistencia de flexión del entrepiso se calcula con el aporte de las vigas y del tablero. El efecto de “trabajo conjunto” entre las vigas se considera multiplicando la resistencia de la viga por el coeficiente  $k_{sys}$  ( $>1$ ).

Análogamente y en forma conservadora, se puede adoptar el mismo coeficiente en el diseño de entrepisos con placas NLT. De esta forma, para los esfuerzos de flexión se debe verificar que:

$$\sigma_{m,d} = M_d / W_y \leq f_{m,d} = k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \times k_h \times k_{sys}$$

donde

$k_{sys}$  es el coeficiente de carga compartida cuyo valor es 1,1 (EC-5),  $k_{mod}$  considera la duración de la carga y la clase de servicio,  $\gamma_M$  es el coeficiente parcial del material,  $k_h$  es el coeficiente de ajuste por altura, y  $f_{m,k}$  es la resistencia característica de flexión.

Para los esfuerzos de corte se debe verificar que:

$$\tau_d = 1,5 \cdot V_d / A \leq f_{v,d} = k_{mod} \times \frac{f_{v,k}}{\gamma_M}$$

donde

$k_{mod}$  considera la duración de la carga y la clase de servicio,  $\gamma_M$  es el coeficiente parcial del material, y  $f_{v,k}$  es la resistencia característica de corte.

En general, la deformación y el comportamiento frente a las vibraciones rigen el diseño de los elementos de madera solicitados a cargas perpendiculares a su plano neutro.

En relación a la deformación, se debe controlar:

1) Integridad: para evitar daños a los elementos no estructurales (cielorrasos, tabiques, aberturas, revestimientos), y garantizar la estanqueidad y el correcto desagüe de las cubiertas. Se consideran las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento:

$$w_{int} \leq \frac{l}{300}$$

2) Confort: para evitar sensaciones de incomodidad en los usuarios debidas a una percepción de las deformaciones o vibraciones. Se consideran las deformaciones debido solamente a las cargas variables (de corta duración):

$$w_{apa} \leq \frac{l}{350}$$

3) Apariencia: para limitar los efectos estéticos visuales de las flechas se limitan las deformaciones debidas a la carga total:

$$w_{apa} \leq \frac{l}{300}$$

A partir de los resultados de los ensayos de flexión de las placas NLT fue posible estimar las propiedades de flexión y la deformación de una losa de entrepiso de 2.70m de luz libre, considerando las cargas de uso habituales de una vivienda

Resistencia a la flexión: 9,48 N/mm<sup>2</sup>.

Resistencia al cortante: 1.85 N/mm<sup>2</sup>.

Deformación máxima (flecha): 3,57 mm

Tomando en cuenta las cargas de uso habituales de una vivienda de este tipo y considerando también una luz libre entre apoyos de 2.70m, podemos determinar que la losa debe resistir:

a la flexión: 3,48 N/mm<sup>2</sup>.

al cortante: 0,19 N/mm<sup>2</sup>.

Deformación (flecha) permitida: 9mm

Por lo tanto podemos concluir que el comportamiento portante de las placas es varias veces superior al requerido en resistencia a la flexión, al cortante y en la deformación permitida.

Con respecto a las vibraciones inducidas por el tránsito humano se debe verificar que:

$$f_0 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{m_{ua}}} > 8\text{Hz}$$

El desempeño estructural de las placas NLT puede incrementarse con una carpeta de hormigón armado ubicada en la cara superior, esto es, en la zona donde se producen tensiones máximas de compresión. Además del tablero estructural especificado en la Guía de diseño y construcción de NLT (2017), una carpeta de hormigón armado aporta rigidez en el plano y resistencia al conjunto. En ese caso, se puede considerar que la placa NLT y la carpeta de hormigón generan una material compuesto madera-hormigón perteneciente al grupo de materiales denominados Timber Concrete Composites (TCC), de sección mixta y que puede ser calculado aplicando métodos analíticos. En particular, Hong (2017) aplicó el “método gama” incluido en las normas de diseño (CSA 086-14, EN 1991-1) para predecir el comportamiento de placas NLT y carpeta de hormigón. La rigidez de flexión para la deformación (KTCC, $\gamma$ ) se calcula de

acuerdo a (1) y la deformación por corte se estima a partir del momento efectivo de inercia ( $I_{0,ef}$ ) de acuerdo a la ec (2)

$$K_{CLT,\gamma} = \sum (E_{0,i} I_{0,ef}) \quad (1)$$

$$I_{0,ef} = \sum \frac{E_{0,i}}{E_{0,c}} \frac{b d_i^3}{12} + \sum \gamma_i \frac{E_{0,i}}{E_{0,c}} b d_i a_i^2 \quad (2)$$

Hong (2019) encontró que el método analítico subestimó la rigidez efectiva (EI) de flexión y sobreestimó la deformación máxima cuando actuó la carga de servicio. Adicionalmente reportó que el método subestimó la resistencia de flexión.

## 5.7 Conclusiones.

Analizados los requerimientos y dificultades en la confección y puesta en obra de las placas NLT y contrastada estas con las necesidades constructivas y las destrezas disponibles en las personas que componen los grupos cooperativos de vivienda por ayuda mutua (es decir, mano de obra no calificada), puede concluirse que el sistema es apropiado para su uso como componente constructivo central de este tipo de cooperativas.

La capacidad portante de las placas NLT es suficiente para soportar las cargas habituales en las construcciones de viviendas de interés social.

Las placas NLT pueden ser manufacturadas utilizando mano de obra no calificada.

## 6 Conclusiones

### Conclusiones generales,

Tomando en consideración los resultados de los ensayos y la discusión de los mismos presentados en los capítulos anteriores puede concluirse que:

El trabajo de tesis logró verificar las hipótesis planteadas.

Es factible construir placas NLT construidas con madera aserrada de (*Pinnus elliottii*) proveniente de plantaciones del noreste de Uruguay y clavos espiralados disponibles en el mercado local.

Fue posible determinar sus propiedades de flexión de modo de ofrecer a los futuros proyectistas y calculistas información acerca de su comportamiento ante la aplicación de cargas.

El trabajo de tesis se desarrolló en tres etapas: i) la primera focalizó en el estudio de las uniones madera-madera, ii) la segunda dedicada a analizar el comportamiento de las placas de tamaño estructural, y iii) la tercera a cuantificar los tiempos de construcción y viabilidad de fabricación de los paneles empleando mano de obra no calificada. Las siguientes conclusiones pueden ser extraídas de cada uno de ellas:

#### i) Uniones clavadas madera-madera.

Las probetas conformadas por 3 tablas de 50mm (PA50) cargadas en dirección paralela a las fibras, presentan valores de resistencia global y por clavo 40% menores que las conformadas por 3 tablas de 35mm (PA35). En consonancia, la media del módulo de deslizamiento de la serie PA35 supera por más del doble a la media de los registrados en la serie PA50. Estos resultados son consistentes con los reportados en la literatura y dispuesto en códigos de construcción en cuanto al aumento en la capacidad de carga de las uniones cuando los clavos atraviesan más de 2 tablas. En ese sentido, se constató que, a pesar de que en las probetas PA50 contaban con la mitad de los clavos por plano de corte que las PA35, (aun cuando no se cumple con el mínimo de 4 conectores por plano de corte que establecen algunas normas internacionales), los valores de  $F_{max}$  alcanzados para iguales desplazamientos, no se redujeron a la mitad, sino que registran valores cercanos al 60%. Probablemente las fuerzas de rozamiento entre las piezas de madera contribuyan a esta mejora, tal como se observó en los ensayos de las probetas de 9 tablas.

Para el caso de las probetas cargadas de forma perpendicular a las fibras (PP35) se registraron valores que, a pesar de ser un 50% más resistentes, mostraron valores de módulo de deslizamiento un 42% menores que las de la serie PA35. Estos resultados están en consonancia con los encontrados por Sosa Zito (2015) quien encontró en sus ensayos menores valores de  $K_s$  en las probetas cargadas en dirección perpendicular a las fibras, confirmando que, para las conexiones múltiples con clavos de pequeño

diámetro, existe una importante influencia de la dirección de las fibras sobre los valores del módulo de deslizamiento instantáneo.

De los resultados de los ensayos realizados con probetas conformadas 9 tablas puede deducirse que el aporte del rozamiento en la resistencia de los cuerpos de prueba es significativo y debe ser tomado en consideración a la hora de confeccionar las placas de tamaño real, ya que los valores medios de carga máximos alcanzados por las probetas y por ende los soportados por cada clavo del grupo P9S son 12% superiores a los de la serie P9C y que el módulo de deslizamiento medio de la serie P9S fue 21% superior a los de las P9C.

Por otra parte, analizados los modos de falla de las 4 series de probetas se constató que ninguna de ellas llegó a la rotura total ni tampoco registró daños fuera del área de conexión, por lo que puede afirmarse que las uniones registraron un comportamiento dúctil en todo el periodo de carga al que fueron sometidas.

Asimismo, se constató que los modos de falla fueron similares a los indicados por Johansen, ya sea para las cargas perpendiculares como en las paralelas a las fibras. Solamente se manifestaron deformaciones no previstas en el modelo en casos de incidencia de las cargas en los planos de corte que el modelo no analiza (probetas de 9 tablas con doble plano de corte con fuerzas de igual dirección y sentido).

## **ii) Comportamiento de las placas NLT de tamaño estructural**

El comportamiento de las placas ante la aplicación de cargas hasta el momento de la rotura es completamente elástico.

Los valores de MOE de las placas conformadas por láminas enteras (PLE), superan por más del doble a los de las conformados por láminas unidas a tope intercaladas con enteras (PLC).

Los valores de MOE de las placas PLE son cercanos o superiores a los del promedio de los de las láminas que las componen, por lo que puede afirmarse que las uniones clavadas colaboran en el trabajo conjunto de las láminas y mejoran la rigidez de la placa.

Los valores de MOR de las placas conformadas por láminas enteras fueron promedialmente un 30 % superiores a las de las conformadas por láminas unidas a tope intercaladas con enteras. Lo mismo sucedió con las cargas máximas soportadas.

Los modos de rotura detectados en las placas se debieron a fallas por tracción, originados mayormente por desviaciones de las fibras muy pronunciadas y por desviaciones debidas a la presencia de nudos o zonas nudosas.

Las uniones a tope de las láminas no fueron causa de las fallas en las placas, pero colaboraron al debilitamiento de su resistencia.

## **iii) Uso de las placas NLT para la construcción de cooperativas de vivienda en el sistema de ayuda mutua.**

Analizadas los requerimientos y dificultades en la confección y puesta en obra de las placas NLT y contrastada estas con las necesidades constructivas y las destrezas disponibles en las personas que componen los grupos cooperativos de vivienda por ayuda mutua, puede concluirse que el sistema es apropiado para su uso como componente constructivo central de este tipo de cooperativas.

La capacidad portante de las placas NLT es suficiente para soportar las cargas habituales en las construcciones de viviendas de interés social.

Las placas NLT pueden ser manufacturadas utilizando mano de obra no calificada.

## 7 Referencias bibliográficas.

- Alam, P., & Ansell, M. (2012). The effects of varying nailing density upon the flexural properties. *Journal of Civil Engineering Research*, 2(1), 7-13.
- American Wood Council. (2018). *National Design Specification® for Wood Construction (NDS®)*. Leesburg, United States: American Wood Council (AWC).
- Arbiza, A. B. (2014). Monografía Final de grado. Departamento de Trabajo Social, FCS-Udelar. *Aspectos poco habitados del cooperativismo de vivienda por ayuda mutua: impactos en la vida familiar*. Montevideo, Uruguay: FCS-Udelar.
- ASTM. (2017). *F1575. Standard Test Method for Determining Bending Yield Moment of Nails*. West Conshohocken, United States: American Society for Testing and Materials.
- Barrenechea, B., Berriel, A., & Cirino, G. (2015). Ayuda mutua como sistema vigente. Factores que inciden en la ayuda mutua: caracterización, dificultades y propuestas. *Revista Dinámica Cooperativa*, 125, 52-55.
- Bertullo, J., Isola, G., Castro, D., & Silveira, M. (2003). *El cooperativismo en Uruguay*. Montevideo: Udelar-Proas-Unicoop.
- Bocquet, J., Pizzi, A., Despres, A., Mansouri, H., Resch, L., Michel, D., & Letort, F. (2007). Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21 (3-4), 301-317.
- Branco, J. M., Cruz, P. J., & Piazza, M. (2009). Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections 23. 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.011. *Construction and Building Materials*, 23, 400-410.
- Buroni, T. (2016). 50 Años. 1966-2016. Medio siglo de cooperativismo de vivienda. *Revista Dinámica Cooperativa*, N° 126, 22-41.
- Canadian Standard Association. (s.f.). *CSA O86 Engineering design in wood*. Canadian Standard Association.
- Canadian Standard Association. (s.f.). *CSA S6-2019 Canadian Highway Bridge Design Code*. Canadian Standard Association.
- Cancela, L., & Ricetto, E. (2015). Sistemas constructivos alternativos en ayuda mutua. ¿Será posible? *Tesis opcional cooperativas*. Montevideo, Uruguay: UPV, FADU-UDELAR.
- Comité europeo de normalización. (1992). *UNE-EN 26891 Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Principios generales para la determinación de las*



- características de resistencia y deslizamiento*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- Derikvand, M., Jiao, H., Kotlarewski, N., Lee, M., Chan, A., & Nolan, G. (2019). Bending performance of nail-laminated timber constructed of fast-grown plantation eucalypt. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77, 421-437.
- Dieste, A. (2012). *Programa de promoción de exportaciones de productos de madera*. Dirección Nacional de Industrias, MIEM. Recuperado el 02 de 05 de 2019, de [http://www.adimau.com.uy/articulos/07\\_programa\\_de\\_promocion\\_de\\_exportaciones\\_de\\_productos\\_de\\_madera\\_2012.pdf](http://www.adimau.com.uy/articulos/07_programa_de_promocion_de_exportaciones_de_productos_de_madera_2012.pdf)
- DINAVI. (2011). *Estándares de desempeño y requisitos para la vivienda de interés social*. Montevideo, Uruguay: DINAVI-MVOTMA.
- DINAVI. (2015). *Programa Cooperativas. Evaluación del Plan quinquenal de vivienda 2010 – 2014*. Montevideo: Documento presentado en COAVI 2015. DINAVI-MVOTMA.
- European Committee for Standardization. (2009). *EN 1380 Timber structures - Test methods - Load bearing nails, screws*. Brussels: European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. (2005). *EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures—Part 1-1: General—Common rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. (2010). *EN 384 - Structural timber—Determination of characteristic values of mechanical properties and density*. Brussels: European Committee for Standardization.
- FUCVAM. (2015). *Informe sobre el concepto de partes sociales y la evaluación del trabajo de los socios (ayuda mutua)*. Montevideo, Uruguay: Documento presentado en COAVI 2015. FUCVAM.
- Haller, & Pannke. (1998). Structural and physical behaviour of nailed laminated timber. *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*, 2, 230-237. Montreux-Lausanne, Suiza.
- Hilson, B. O. (1995). Nailed joints. En *Timber Engineering STEP 1, Basis of Design, Material Properties, Structural Components and Joints*. Centrum Hout, The Netherlands.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2018). *UNIT 1261 Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de pino taeda y pino ellioti (Pinus taeda y Pinus elliotii)*. Montevideo: UNIT.
- Johansen, K. W. (1949). *Theory of timber connections*. Berna: International Association for Bridge and Structural Engineering.

- Ma, T. (2019). *Effect of butt joints on flexural properties of nail laminated timber*. Canadá: University of New Brunswick.
- Maneiro, A. (2016). FUCVAM. *Revista Dinámica cooperativa*, N° 126, 47-48.
- Naciones Unidas UNFCC. (2015). *Acuerdo de París*. Recuperado el 03 de 10 de 2019, de [https://unfccc.int/sites/default/files/spanish\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf)
- Nahoum, B. (2008). *Una historia con quince mil protagonistas. Las cooperativas de Vivienda por Ayuda Mutua uruguayas*. Montevideo, Uruguay: Intendencia de Montevideo-Junta de Andalucía.
- Nahoum, B. (2013). *Algunas claves. Reflexiones sobre aspectos esenciales de la vivienda cooperativa por ayuda mutua*. Montevideo, Uruguay: Trilce.
- Nail Laminated Timber, Canadian (or US) design and construction guide. (s.f.).
- Ogunrinde, O. (2019). Evaluation of bending performance of nail laminated and dowel laminated timber. *Tesis*. Canadá: University of New Brunswick.
- Piter, J., Guillaumet, A., Sosa Zitto, M., & Ramos, M. (2014). Capacidad portante de uniones con clavos de pequeño diámetro: análisis comparativo de los resultados de ensayos con los calculados según las reglas de diseño del Eurocódigo 5, del Reglamento CIRSOC 601 y de la norma NBR 7190. *XIV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira 28-30/Abril, 2014, Natal, RN, Brasil*. doi:<http://hdl.handle.net/20.500.12272/4710>
- Piter, J., Sosa Zitto, M. A., & Ramos, M. d. (2018). *Rigidez de conexiones de madera de Eucalyptus grandis de Argentina con clavos de pequeño diámetro. Análisis del módulo de deslizamiento determinado para diversas configuraciones de uniones*. Anais eletrônicos do 16º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras & 3º Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira (2018).
- Ramage, M. &. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 333-359.
- Recalde, S., & Menéndez, A. (2003). *Evaluación de la participación del usuario en relación a los sistemas constructivos utilizados. El caso de las cooperativas de vivienda de la IMM*. Montevideo, Uruguay: Investigación CSIC. UPV, FADU-UDELAR.
- Sosa Zitto, M., Köhler, J., & Piter, J. (2014). Load-carrying capacity of timber-to-timber joints of fast-growing Argentinean Eucalyptus grandis with nails of small diameter laterally loaded in double shear: analysis according to the criterion adopted by European standards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72, 21-34.

Tannert, T. (2002). Estudio de elementos laminados clavados para la construcción de viviendas de madera en Chile. *Tesis*. Concepción, Chile.

UNIT, 1261 (UNIT).

Williams, G., Bonhoff, D., & Moody, G. (1994). *Bending Properties of Four- Layer Nail-Laminated Posts*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Zhu, W. (2018). Moisture content and joint behavior of bridge decks made of mechanically laminated timber. *Tesis*. Canadá: University of New Brunswick.

## Anexos.

### Anexo A

#### 1. Ensayo de clavos

Resultados de los ensayos realizados a 49 clavos espiralados de 3,1 mm de diámetro aplicando las disposiciones de la norma ASTM-F1575 (2013).

Ensayado en máquina Shimadzu AGS-100, en el Laboratorio de Procesos Industriales de la Madera,

Ensayo	dP/dx [N/mm]	Py [N]	My [N.mm]	Fyb [N/mm <sup>2</sup> ]		
1	57,65	428,68	3858,09	777,03		
2	54,16	402,01	3618,05	728,69		
3	54,62	422,67	3804,02	766,14		
4	57,59	410,53	3694,73	744,13		
5	56,87	383,30	3449,68	694,78		
6	59,73	402,51	3622,63	729,61		
7	55,93	413,93	3725,34	750,29		
8	54,73	394,22	3547,95	714,57		
9	56,41	399,64	3596,73	724,39		
10	62,07	406,36	3657,25	736,58		
11	56,38	414,16	3727,48	750,73		
12	55,95	407,31	3665,83	738,31		
13	56,13	421,67	3795,00	764,33		
14	59,01	409,09	3681,85	741,54		
15	56,67	417,95	3761,53	757,58		
16	53,67	412,72	3714,47	748,10		
17	54,69	418,00	3761,96	757,67		
18	54,98	416,07	3744,65	754,18		
19	58,00	399,99	3599,88	725,03		
20	55,58	420,43	3783,85	762,08		
21	54,97	422,38	3801,44	765,62		
22	57,36	399,03	3591,30	723,30		
23	57,81	394,42	3549,81	714,94		
24	55,63	404,90	3644,08	733,93		
25	56,85	409,84	3688,57	742,89		
26	55,79	401,70	3615,33	728,14		
27	55,63	416,36	3747,22	754,70		
28	52,90	399,72	3597,45	724,54		
29	56,24	413,34	3720,04	749,23		
30	56,58	414,50	3730,49	751,33		
	<b>56,35</b>	<b>409,25</b>	<b>3683,22</b>	<b>741,81</b>	Media	
	<b>1,85</b>	<b>10,24</b>	<b>92,16</b>	<b>18,56</b>	Desv. Estándar	
	<b>3,29</b>	<b>2,50</b>	<b>2,50</b>	<b>2,50</b>	COV	
			<b>F<sub>max</sub> /clavo</b>	<b>5599,0</b>	<b>N</b>	

Sede Tacuarembó del Centro Universitario Regional Noreste, Udelar.

Diámetro de los clavos: 3.1 mm (promedio sobre siete mediciones)

Diámetro de los apoyos: 10 mm (según norma)

(S<sub>bp</sub>) Distancia entre apoyos según tabla 1 de la norma: 1.4 inches = 36 mm)

Velocidad de ensayo: 6.35 mm/min

**dP/dx:** pendiente de la curva carga desplazamiento (calculada en el rango 0.1-0.4 de P<sub>max</sub>)

**P<sub>y</sub>:** Carga de fluencia (punto de cruce con la recta desplazada un 5% del diámetro)

**M<sub>y</sub>:** Momento de fluencia  $M_y = P_y \times s_{bp}/4$  (N/mm)

Donde:

*P:* Carga de fluencia (punto de cruce con la recta desplazada un 5% del diámetro) (N/mm)

*S<sub>bp</sub>:* Distancia entre apoyos de acuerdo a tabla 1 de la norma: 1.4 inches (redondeado a 36 mm)

**F<sub>yb</sub>:** Tensión de fluencia en flexión  $F_{yb} = \frac{M_y}{S}$  (N/mm<sup>2</sup>)

Siendo:

*M<sub>y</sub>:* Momento de fluencia (N/mm)

*S:* Módulo plástico efectivo de la sección =  $D^3/6$ , (siendo D el diámetro del clavo).

## 2. Ensayo de vigas.

### Estimación de las propiedades estructurales de las tablas utilizadas.

Módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ), por el método de onda de impacto utilizando el equipo NDT (Fakopp Microsecond Timer) de acuerdo a (1):  $E_d = \rho \times v^2$  (1)

donde:  $\rho$  es la densidad de la viga (kg/m<sup>3</sup>) al momento de ensayo, y  $v$  es la velocidad de propagación de onda sónica en recorrer la distancia entre dos transductores, cada uno ubicado en las testas de la viga, estimada con el equipo NDT (m/s).

Para cada viga el módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$ ) se obtuvo de acuerdo a (2):

$$E_{m,g} = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (2)$$

donde:  $a$  es la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo (mm),  $L$  es la luz de ensayo (mm),  $b$  y  $h$  son base y altura (mm) respectivamente,  $G$  es el módulo de elasticidad transversal, considerado como infinito;  $F_2 - F_1$  es el incremento de carga en la línea recta de regresión entre el 10% y 40% de la carga máxima estimada (N);  $w_2 - w_1$  es el incremento de deformación correspondiente a  $F_2 - F_1$  (mm).

Vig	Clasif	CH %	Esp pro	anch	MOE GLO	MOE globa	MOE local	Peso (kg)	Peso (kg)	Largo (m)	Densid	Densid	MOE	MOE
						corr.CH		corr.CH				corr.CH	Pesa	Fakop
1	EC1	10,50	50,1	151,3	8138,80479	8261	8973	10,618	9,50	2,85	0,4401	0,44344468	8057	10207,28
4	EC1	11,77	50,0	151,4	9653,93515	9676	10658	9,764	8,62	2,85	0,3996	0,40009618	9352	11540,13
5	EC0	12,00	50,0	151,2	5275,4357	5275	5824	9,423	8,29	2,85	0,3852	0,38521298	8212	9466,841
6	EC1	11,10	49,9	147,9	9278,87339	9362	10189	9,362	8,32	2,85	0,3959	0,39771289	10759	13348
8	EC1	12,33	49,9	150,7	9597,13268	9565	10591	9,39	8,23	2,85	0,3844	0,38374794	9068	11669,75
9	EC1	12,00	50,6	151,1	5292,90739	5293	5842	9,41	8,28	2,85	0,3798	0,37975794	5272	6641,078
11	EC0	11,33	50,6	150,7	8431,46196	8488	9293	9,158	8,12	2,85	0,3735	0,37476217	7218	8207,454
14	EC1	11,73	50,0	150,7	8626,93356	8650	9514	10,024	8,85	2,85	0,4121	0,41261631	8872	9767,168
16	EC0	10,93	49,9	150,9	4555,57392	4604	5022	10,36	9,23	2,85	0,4303	0,43258269	4481	5659,794
18	EC1	10,23	50,2	151,3	7886,87404	8026	8692	9,868	8,86	2,85	0,4093	0,41290756	7719	8980,63
19	EC0	12,00	50,1	150,9	5669,8765	5670	6257	9,32	8,20	2,85	0,3805	0,3804901	5395	6701,023
20	EC0	10,73	49,8	150,3	4542,74535	4600	5003	10,434	9,31	2,85	0,4368	0,43958545	5120	6365,073
21	EC0	11,20	49,4	149,8	6763,4631	6818	7447	10,228	9,08	2,85	0,4306	0,43232913	6855	7303,707
22	EC0	11,23	49,9	150,2	4601,59097	4637	5069	9,32	8,27	2,85	0,3870	0,38844999	4792	5724,008
24	EC0	12,00	49,9	151,0	4071,1089	4071	4494	8,271	7,28	2,85	0,3388	0,33884615	4137	5181,858
25	EC0	12,00	50,0	150,6	6677,39408	6677	7365	10,401	9,15	2,85	0,4265	0,4264987	7242	7851,327
26	EC0	11,27	50,1	151,0	4633,83214	4668	5110	9,684	8,59	2,85	0,3983	0,39977076	4568	5889,762
27	EC0	11,10	49,9	144,9	3822,348	3857	4180	9,357	8,32	2,85	0,4038	0,40561449	4551	5266,063
30	EC0	12,00	49,7	151,0	6792,43283	6792	7496	8,91	7,84	2,85	0,3666	0,36660782	7096	9901,164
31	EC1	11,07	49,9	150,9	8781,65616	8864	9682	8,903	7,92	2,85	0,3688	0,37047331	8677	10291,53
34	EC0	10,37	50,2	151,2	6755,9894	6866	7447	9,795	8,78	2,85	0,4062	0,40947167	6641	8466,126
36	EC0	11,37	49,9	150,5	5068,09018	5100	5586	9,328	8,27	2,85	0,3860	0,38722826	7646	10770,08
37	EC1	12,00	49,9	151,2	6527,76288	6528	7205	10,063	8,86	2,85	0,4114	0,41143138	6095	7495,208
38	EC0	11,40	49,9	151,0	5595,70251	5629	6172	9,09	8,05	2,85	0,3749	0,37602839	5865	7066,455
39	EC0	11,77	49,9	151,2	7248,81804	7266	8001	8,42	7,43	2,85	0,3456	0,34598661	7783	8414,284
40	EC1	11,90	49,9	150,8	4944,82908	4950	5455	11,991	10,56	2,85	0,4932	0,49349307	4798	5943,82
41	EC0	12,37	49,8	150,9	6233,63862	6211	6881	9,563	8,38	2,85	0,3913	0,39057329	6291	8171,256
42	EC0	12,00	49,8	149,8	6746,50746	6747	7434	9,728	8,56	2,85	0,4025	0,40246364	7517	9219,294
43	EC0	12,00	50,1	151,0	5371,79627	5372	5929	8,814	7,76	2,85	0,3593	0,35934803	5211	6954,104
47	EC0	10,97	50,0	150,7	5164,34934	5218	5691	11,305	10,07	2,85	0,4693	0,47168692	5301	6580,814
48	EC0	12,00	49,8	151,0	4862,40599	4862	5364	10,356	9,11	2,85	0,4255	0,42553265	5217	6829,931
49	EC1	11,50	50,3	151,2	4999,18522	5024	5515	10,196	9,02	2,85	0,4165	0,41758265	4963	5834,187
50	EC0	11,07	49,8	151,2	6097,94977	6155	6726	8,507	7,57	2,85	0,3523	0,35392999	6484	7866,919
52	EC0	11,80	49,9	150,4	5049,55652	5060	5565	9,222	8,13	2,85	0,3806	0,38101368	5096	6528,294
53	EC0	11,67	49,9	150,9	5240,29746	5258	5781	11,996	10,60	2,85	0,4936	0,49441937	5680	6441,139
54	EC0	11,33	50,0	151,3	4657,33536	4688	5139	11,207	9,94	2,85	0,4607	0,46220005	4654	6287,487
57	EC0	11,33	49,8	150,6	5286,19296	5321	5827	8,906	7,90	2,85	0,3696	0,37086101	5574	7189,755
59	EC0	11,47	49,9	151,0	8144,91237	8188	8985	8,752	7,75	2,85	0,3610	0,36195263	8330	9251,505
60	EC1	10,70	49,8	151,1	6674,03546	6761	7357	9,192	8,21	2,85	0,3828	0,38524405	6442	8243,845
61	EC0	12,00	49,9	150,2	6173,76073	6174	6807	8,672	7,63	2,85	0,3570	0,35699177	6081	6972,881
64	EC1	11,10	50,1	150,8	5334,67782	5383	5881	8,824	7,84	2,85	0,3644	0,36608959	5173	6329,867
65	EC0	11,40	49,9	150,9	3448,29744	3469	3803	10,269	9,10	2,85	0,4239	0,42516754	3658	4336,094
68	EC0	11,40	49,9	148,4	4917,58685	4947	5405	8,867	7,86	2,85	0,3725	0,37364641	5698	6795,29
69	EC0	11,63	50,0	150,6	6794,70148	6820	7492	9,895	8,74	2,85	0,4074	0,40816018	7456	9337,85
73	EC1	11,37	50,0	150,8	5582,85951	5618	6156	10,114	8,96	2,85	0,4172	0,41850049	5768	8140,166
75	EC1	11,53	50,0	150,5	4905,49028	4928	5408	10,087	8,92	2,85	0,4160	0,41699925	4804	5891,878
76	EC0	11,27	49,9	151,0	3300,07218	3324	3640	9,955	8,83	2,85	0,4113	0,41281585	3429	4459,342
77	EC0	12,00	50,0	151,1	4901,52024	4902	5411	10,681	9,40	2,85	0,4369	0,43687127	5303	6173,072
79	EC0	12,00	50,1	150,8	4053,28596	4053	4473	10,148	8,93	2,85	0,4149	0,41485354	4159	5269,916
80	EC0	12,23	50,0	151,1	5629,91211	5617	6216	8,629	7,57	2,85	0,3520	0,35155438	5443	6792,321
89	EC0	12,00	49,8	150,7	5582,38042	5582	6158	9,387	8,26	2,85	0,3861	0,38613969	5728	7249,069
91	EC0	11,17	49,9	150,9	4741,60897	4781	5228	11,782	10,47	2,85	0,4876	0,48966439	4922	6403,827
92	EC1	11,50	50,1	150,8	6045,2661	6075	6667	10,82	9,58	2,85	0,4447	0,44576214	6999	7440,39
93	EC1	11,40	50,2	150,6	5922,06943	5958	6529	10,148	8,99	2,85	0,4171	0,4183407	5960	7801,823
95	EC0	11,50	50,0	151,1	5402,82739	5430	5960	9,87	8,73	2,85	0,4058	0,40684482	5033	6710,167
107	EC0	12,00	49,8	150,6	5073,98055	5074	5597	9,742	8,57	2,85	0,4007	0,40067866	5256	6173,167
108	EC0	12,00	50,0	150,9	5866,65018	5867	6474	10,456	9,20	2,85	0,4275	0,42752171	6093	6920,419
110	EC0	12,00	50,0	151,1	8233,95963	8234	9090	9,841	8,66	2,85	0,4019	0,40187064	8161	9410,383
115	EC1	11,13	50,1	151,4	8684,6366	8760	9582	9,812	8,72	2,85	0,4036	0,40530917	8911	10150,46
121	EC1	11,67	49,8	151,2	9267,04372	9298	10227	11,012	9,73	2,85	0,4532	0,45400256	9897	10722,89
122	EC0	12,00	49,9	151,3	5215,9192	5216	5759	9,694	8,53	2,85	0,3966	0,39657566	5080	6547,476
127	EC0	10,83	50,0	150,9	3796,06954	3840	4184	10,247	9,14	2,85	0,4249	0,42733968	3827	4860,475
128	EC0	12,00	49,7	150,0	4950,42181	4950	5229	11,436	10,06	2,85	0,4732	0,47324545	5080	6060,293
130	EC0	11,50	50,0	150,9	4411,65624	4434	4865	10,6	9,38	2,85	0,4366	0,43767031	4751	5371,683

130	ECO	11,50	50,0	150,9	4411,65624	4434	4865	10,6	9,38	2,85	0,4366	0,43767031	4751	5371,683
132	ECO	12,00	49,9	150,8	6417,66038	6418	7082	9,465	8,33	2,85	0,3881	0,38812956	5110	6458,164
140	EC1	10,97	50,0	150,9	5554,44079	5612	6123	8,184	7,29	2,85	0,3390	0,34079494	5529	6221,66
141	ECO	11,30	50,2	151,0	3466,81188	3491	3824	10,966	9,73	2,85	0,4506	0,45212859	3414	4001,58
142	EC1	12,00	49,9	151,2	4897,23129	4897	5407	11,129	9,79	2,85	0,4559	0,45589773	4934	6527,296
156	EC1	11,70	50,0	150,8	4500,24034	4514	4964	9,731	8,59	2,85	0,4000	0,40055153	4416	6189,964
157	ECO	11,30	50,0	150,8	5732,33056	5772	6320	8,987	7,97	2,85	0,3714	0,37265941	4922	6113,408
158	EC1	11,97	50,4	151,2	10794,2453	10798	11914	11,348	9,99	2,85	0,4603	0,46033107	10791	10884,42
169	ECO	11,50	50,1	151,2	3611,16646	3629	3985	9,234	8,17	2,85	0,3789	0,37984553	3640	4491,348
173	EC1	11,70	49,9	150,8	6114,05511	6132	6744	10,059	8,88	2,85	0,4141	0,41469953	6257	7118,389
177	ECO	11,60	50,1	151,0	8510,08864	8544	9389	10,348	9,15	2,85	0,4243	0,42512549	8825	12106,97
183	ECO	11,43	50,0	151,1	6793,7264	6832	7495	9,69	8,58	2,85	0,3986	0,39969023	6748	7619,038
184	ECO	10,27	49,8	150,8	6547,84461	6661	7213	9,32	8,36	2,85	0,3907	0,39405324	6344	7348,577
189	ECO	11,13	49,9	150,9	6902,8042	6963	7611	9,501	8,44	2,85	0,3935	0,3952375	6803	7138,181
190	ECO	11,43	50,0	148,2	4423,99191	4449	4860	10,009	8,86	2,85	0,4198	0,42100208	4866	5576,941
191	ECO	11,23	50,0	150,9	4069,76201	4101	4488	10,351	9,19	2,85	0,4273	0,42897151	4096	5004,257
196	ECO	11,53	49,8	150,7	4389,87381	4410	4837	10,433	9,23	2,85	0,4312	0,43224761	4771	5628,443
198	ECO	11,67	50,2	151,3	6914,36876	6937	7631	11,291	9,97	2,85	0,4607	0,46150148	7324	8330,781
199	ECO	11,93	49,9	151,1	6281,87336	6286	6934	9,594	8,45	2,85	0,3932	0,39332035	6427	7369,198
200	EC1	12,27	49,8	150,9	6437,46257	6420	7106	10,085	8,85	2,85	0,4133	0,41271696	6195	7300,757
202	ECO	12,03	50,1	150,9	4669,51315	4668	5153	9,521	8,38	2,85	0,3892	0,38912226	4759	5586,228
203	ECO	11,17	49,8	151,1	6938,94562	6997	7653	9,785	8,69	2,85	0,4052	0,4068904	7389	8408,745
204	ECO	11,80	49,9	150,7	3809,06089	3817	4201	9,119	8,04	2,85	0,3753	0,37568969	3963	4822,215
205	EC1	11,80	50,2	150,9	9523,94956	9543	10508	9,325	8,22	2,85	0,3812	0,3816199	9708	10384,56
206	ECO	11,37	49,9	150,7	5551,12245	5586	6120	10,574	9,37	2,85	0,4372	0,43859531	5775	6959,838
207	ECO	10,30	49,8	148,8	4765,38276	4846	5235	10,855	9,74	2,85	0,4611	0,46498721	5112	6633,304
208	ECO	11,57	50,1	151,0	6946,55694	6977	7663	9,111	8,06	2,85	0,3738	0,37458349	7346	8743,255
209	ECO	10,70	49,9	150,5	3670,21085	3718	4043	10,206	9,11	2,85	0,4255	0,42827234	3739	4774,647
210	EC1	11,90	49,8	151,2	7637,79741	7645	8432	10,378	9,14	2,85	0,4261	0,42627676	7659	9318,612
212	EC1	11,50	49,9	151,0	8430,71765	8473	9299	9,539	8,44	2,85	0,3932	0,39417943	8211	9295,739
213	ECO	11,23	50,0	150,9	5080,27035	5119	5601	10,267	9,11	2,85	0,4237	0,42531972	5039	6135,081
214	ECO	11,80	49,9	150,7	3850,70098	3858	4247	9,463	8,35	2,85	0,3892	0,38961054	3762	4971,458
215	ECO	11,57	50,2	151,3	6782,22769	6812	7482	9,807	8,67	2,85	0,4007	0,40155302	6597	9292,568
216	ECO	11,23	50,1	151,1	5048,90332	5088	5568	10,503	9,32	2,85	0,4323	0,43399077	5161	7690,133
217	ECO	11,83	50,1	151,3	8015,73042	8029	8849	9,069	8,00	2,85	0,3706	0,37092086	8492	9861,47
218	ECO	11,57	49,9	150,8	5217,30662	5240	5754	9,151	8,09	2,85	0,3772	0,37804364	5241	6556,007
219	ECO	11,30	49,9	150,7	5165,69788	5202	5695	8,726	7,74	2,85	0,3610	0,36230268	4756	6460,577
220	ECO	11,53	49,9	151,3	8950,66108	8992	9878	10,578	9,36	2,85	0,4351	0,43611766	8335	10174,87
221	ECO	11,80	49,8	150,6	7698,80229	7714	8491	10,727	9,46	2,85	0,4424	0,44280242	8308	9935,279
222	ECO	12,03	49,9	150,9	5618,45263	5617	6200	9,055	7,97	2,85	0,3712	0,37109038	5385	6130,504
223	EC1	12,30	49,9	150,9	5633,38904	5616	6219	9,311	8,17	2,85	0,3806	0,3800454	5672	6575,557
224	ECO	11,47	49,9	150,9	6687,08557	6723	7376	8,802	7,79	2,85	0,3634	0,36431929	7588	8203,784
225	ECO	11,57	50,0	150,6	5559,34777	5583	6129	10,488	9,27	2,85	0,4319	0,4328322	6225	7962,095
226	ECO	11,40	50,1	151,2	5997,95488	6034	6615	10,295	9,12	2,85	0,4228	0,42407707	5974	7075,941
227	ECO	11,70	50,0	151,2	7217,18238	7239	7965	10,986	9,70	2,85	0,4503	0,45097436	7765	9188,375
228	ECO	11,87	50,0	151,0	5576,85047	5584	6154	9,904	8,73	2,85	0,4057	0,40599133	5571	7300,536
231	ECO	11,73	50,0	151,0	5458,09812	5473	6023	10,021	8,85	2,85	0,4114	0,41193937	5628	7872,43
232	ECO	11,53	50,0	151,3	4410,05351	4431	4866	10,864	9,61	2,85	0,4462	0,44722125	4482	5410,067
233	EC1	11,23	49,9	150,3	6131,10224	6178	6755	10,9	9,68	2,85	0,4530	0,45468905	5592	7069,782
235	ECO	11,23	50,1	151,2	7080,92881	7135	7807	9,053	8,04	2,85	0,3721	0,37350427	6451	8363,617
237	ECO	11,77	50,0	150,9	4296,22343	4306	4740	10,361	9,14	2,85	0,4255	0,42601333	4371	5399,231
239	ECO	11,37	50,0	151,0	7122,12902	7167	7856	10,338	9,16	2,85	0,4256	0,42689932	6641	9739,877
240	ECO	11,20	49,8	150,7	5332,57254	5375	5878	9,782	8,69	2,85	0,4058	0,40747127	8734	5933,704
241	EC1	11,20	50,2	151,0	5957,28062	6005	6569	9,988	8,87	2,85	0,4108	0,41241129	5933	7339,661
242	EC1	11,60	49,8	150,7	8524,07925	8558	9401	11,755	10,39	2,85	0,4859	0,48689274	8393	9901,39
243	ECO	11,77	49,8	150,6	8892,56501	8913	9807	8,615	7,60	2,85	0,3558	0,35624356	9075	10130,25
244	ECO	11,73	49,8	151,0	5203,29665	5217	5741	11,697	10,32	2,85	0,4815	0,48218587	5094	6714,367
245	ECO	12,10	50,1	149,9	6738,63545	6732	7426	9,725	8,55	2,85	0,3992	0,39901916	6821	8265,455
247	EC1	11,43	50,0	150,7	6023,54172	6058	6641	8,974	7,95	2,85	0,3701	0,37117335	5848	7021,036
248	ECO	11,57	49,9	151,0	4126,09807	4144	4552	9,895	8,75	2,85	0,4075	0,40837461	4184	5790,593
249	ECO	11,77	50,0	151,2	5357,00152	5370	5912	8,994	7,94	2,85	0,3687	0,3690802	4754	6710,211
250	ECO	11,77	50,1	151,9	6272,92785	6288	6930	10,464	9,23	2,85	0,4261	0,42661747	6637	9099,544
252	ECO	11,47	50,1	151,8	8227,63021	8272	9084	9,277	8,21	2,85	0,3789	0,37994875	7659	9738,315
253	ECO	11,33	50,1	151,1	7299,7519	7348	8052	9,023	8,00	2,85	0,3711	0,37232133	5999	6796,027
254	ECO	11,50	50,0	151,1	6741,94212	6776	7438	10,227	9,05	2,85	0,4207	0,42178636	6956	8425,591
255	ECO	11,67	50,0	150,7	5696,44131	5715	6283	9,227	8,15	2,85	0,3795	0,38013872	5499	7197,458
256	ECO	10,83	49,8	150,8	7677,93154	7768	8462	10,316	9,20	2,85	0,4296	0,43208141	7553	9096,034
257	ECO	11,93	49,9	150,2	3905,06928	3908	4305	10,361	9,12	2,85	0,4271	0,4272144	3789	4876,184
258	ECO	11,20	49,8	151,0	6968,92975	7025	7686	9,028	8,02	2,85	0,3739	0,37534888	6652	9132,137

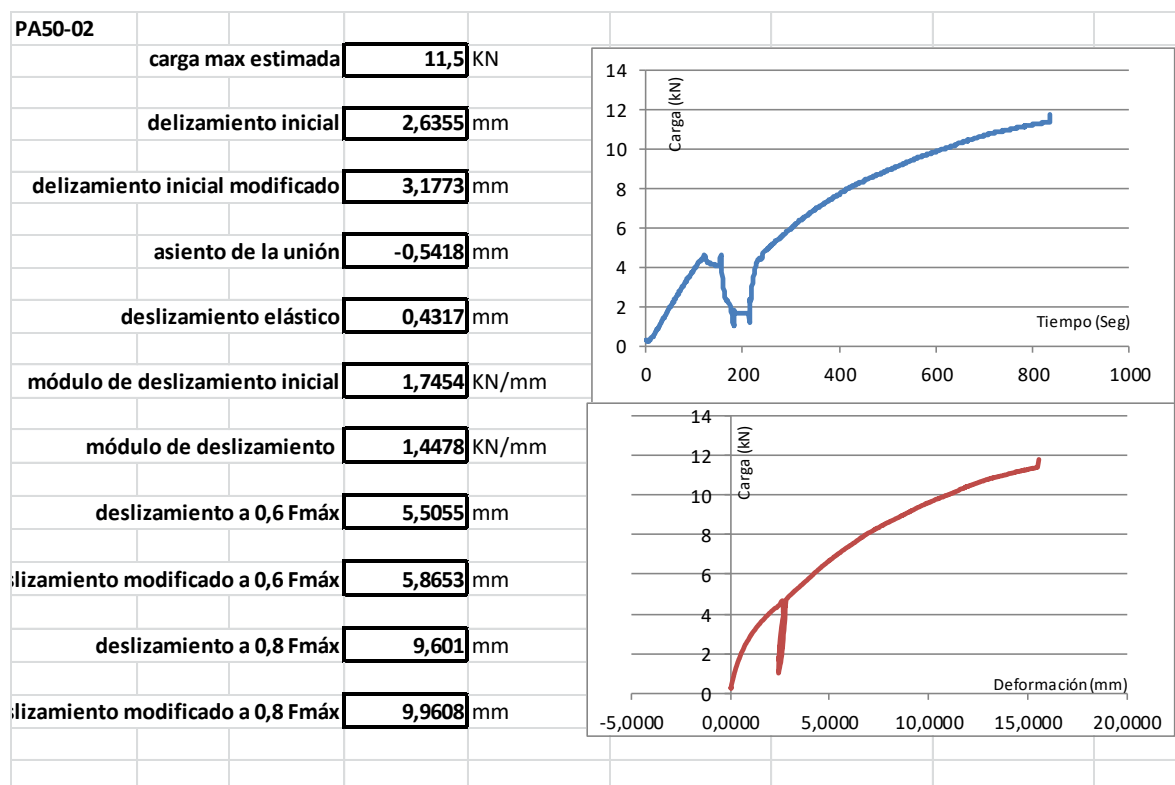
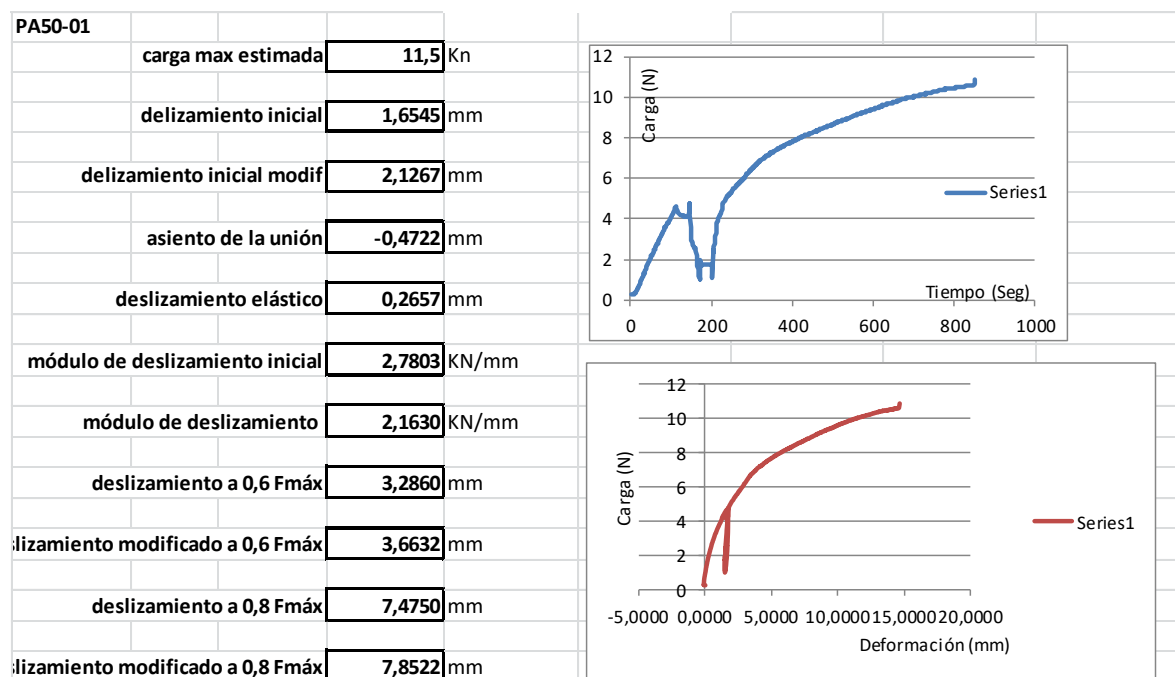
259	ECO	12,00	50,1	146,2	3967,24027	3967	4351	9,711	8,55	2,85	0,4095	0,40948667	4894	5819,308
260	ECO	10,70	50,1	151,9	9256,74575	9377	10215	8,437	7,53	2,85	0,3476	0,34984164	8824	10363,52
263	ECO	12,00	49,9	151,1	4389,0568	4389	4845	10,649	9,37	2,85	0,4366	0,4365805	4285	5299,308
266	ECO	11,10	49,7	150,7	6111,79027	6167	6736	8,68	7,72	2,85	0,3615	0,36314874	5744	6988,375
267	ECO	11,47	50,2	151,0	6862,23007	6899	7570	9,349	8,28	2,85	0,3830	0,38398194	6600	9070,291
268	EC1	12,33	50,2	150,7	7408,98269	7385	8177	10,632	9,32	2,85	0,4320	0,43125232	7758	8949,496
269	EC1	10,83	50,0	146,8	5526,85637	5591	6058	10,177	9,07	2,85	0,4336	0,43615839	6726	7423,7
270	EC1	12,67	49,9	150,8	8096,33307	8042	8937	9,924	8,67	2,85	0,4041	0,40272002	7901	8759,52
271	ECO	11,47	49,9	151,0	5070,19861	5097	5592	11,197	9,91	2,85	0,4616	0,4628107	5904	7224,575
272	ECO	12,00	49,7	150,7	4832,91248	4833	5332	8,844	7,78	2,85	0,3644	0,36441324	4950	6419,263
273	ECO	12,00	50,0	150,6	3619,41314	3619	3993	9,79	8,62	2,85	0,4012	0,40122204	3951	4675,972
274	EC1	11,40	50,0	150,6	3951,03397	3975	4355	9,586	8,49	2,85	0,3956	0,39682378	4454	5376,745
275	ECO	12,00	49,9	150,9	9137,62089	9138	10084	11,114	9,78	2,85	0,4558	0,45583244	9763	11204,95
276	ECO	12,00	50,0	150,6	5570,73541	5571	6145	9,262	8,15	2,85	0,3800	0,37996237	6138	6905,527
277	ECO	12,00	50,0	150,8	5589,93614	5590	6168	9,035	7,95	2,85	0,3703	0,37026519	5784	6931,393
278	ECO	12,00	49,8	151,0	7659,81837	7660	8454	10,164	8,94	2,85	0,4172	0,41720518	8222	9422,261
280	ECO	12,00	50,0	150,8	5422,98346	5423	5984	8,88	7,81	2,85	0,3637	0,36369488	5853	7322,002
281	ECO	12,00	50,1	150,7	7131,22707	7131	7868	8,08	7,11	2,85	0,3302	0,33020997	7686	8927,462
282	EC1	10,53	50,0	149,9	8629,83358	8756	9497	8,55	7,65	2,85	0,3584	0,36105246	9256	11051,51
283	EC1	11,20	49,9	151,0	10783,516	10870	11891	9,03	8,02	2,85	0,3731	0,37459643	10555	12998,78
284	ECO	12,00	49,8	150,8	4514,11844	4514	4981	8,465	7,45	2,85	0,3478	0,34775674	4904	5800,587
285	EC1	11,33	50,3	151,0	6875,28302	6921	7583	8,485	7,52	2,85	0,3477	0,34888226	6854	8231,877
286	EC1	11,53	50,0	150,9	4162,7934	4182	4591	9,31	8,24	2,85	0,3832	0,38405372	4390	4984,846
287	ECO	12,00	49,9	150,6	5531,95903	5532	5824	8,63	7,59	2,85	0,3547	0,35472126	7038	7983,851
288	EC1	11,53	49,9	150,7	4746,17169	4768	5234	9,17	8,11	2,85	0,3786	0,37951469	4576	5694,663
289	ECO	12,00	50,0	151,0	6086,22582	6086	6718	8,43	7,42	2,85	0,3447	0,34472304	6487	7319,005
290	ECO	12,00	49,9	148,6	4368,10308	4368	4806	8,37	7,37	2,85	0,3482	0,34823749	5260	6260,456
291	ECO	12,00	50,1	150,4	4160,62383	4161	4588	9,49	8,35	2,85	0,3889	0,38891703	4534	5480,662
292	ECO	12,00	50,1	151,0	6040,86145	6041	6667	8,21	7,22	2,85	0,3354	0,33538346	6122	7422,769
293	ECO	12,00	49,9	149,5	3136,66582	3137	3455	8,62	7,59	2,85	0,3569	0,35687767	3326	4540,131
294	ECO	12,00	50,2	151,2	5641,31398	5641	6228	9,25	8,14	2,85	0,3765	0,37646616	6440	7217,301
296	EC1	10,97	50,0	151,5	9928,18765	10031	10954	8,75	7,79	2,85	0,3606	0,36250164	9939	11052,59
297	ECO	12,00	49,9	150,8	5280,91473	5281	5827	10,22	8,99	2,85	0,4191	0,41912602	5647	7162,723
298	EC1	11,40	49,7	150,8	4050,78133	4075	4463	8,09	7,17	2,85	0,3358	0,33679329	4322	4943,038
299	ECO	12,00	50,5	151,3	8235,90313	8236	9092	10,967	9,65	2,85	0,4428	0,44282506	8865	9055,788
301	ECO	12,00	49,9	151,0	4623,11572	4623	5102	8,646	7,61	2,85	0,3544	0,35442917	4891	5709,549
302	EC1	11,63	49,9	151,1	7536,77698	7564	8314	8,713	7,70	2,85	0,3580	0,35862129	7232	9189,962
303	ECO	12,00	50,1	151,2	8735,53614	8736	9642	8,242	7,25	2,85	0,3362	0,33617067	8717	10738,88
305	ECO	12,00	49,8	151,1	4087,50785	4088	4512	9,173	8,07	2,85	0,3765	0,37645456	4296	5374,497
306	EC1	11,93	49,8	150,8	6358,47953	6363	7015	8,64	7,61	2,85	0,3556	0,35573733	6221	7374,504
307	ECO	12,00	49,8	151,0	6625,76912	6626	7313	10,08	8,87	2,85	0,4135	0,41345508	6877	7962,035
310	ECO	11,20	50,1	149,7	8208,70956	8274	9037	9,388	8,34	2,85	0,3897	0,39129714	9048	11162,71
311	EC1	11,07	49,8	150,3	4182,36683	4221	4608	8,433	7,50	2,85	0,3514	0,35307078	4528	5842,312
312	EC1	11,47	49,8	151,1	6785,63946	6822	7486	10,8	9,56	2,85	0,4458	0,44698071	6947	8660,167
313	EC1	12,77	50,0	151,1	5642,4616	5599	6233	10,627	9,27	2,85	0,4310	0,42930952	5898	6944,268
314	ECO	11,20	50,0	151,1	8084,08193	8149	8916	10,038	8,91	2,85	0,4138	0,41540606	7933	9344,179
315	ECO	10,77	50,2	151,4	6992,55248	7079	7712	10,028	8,95	2,85	0,4131	0,41562244	7187	8432,783
316	ECO	11,90	50,0	150,9	7382,64003	7390	8147	10,855	9,56	2,85	0,4447	0,44487908	7269	9716,876
317	ECO	11,73	49,9	151,1	5332,06355	5346	5884	10,754	9,49	2,85	0,4414	0,44203344	4773	6193,348
318	EC1	11,80	50,1	150,5	7195,29867	7210	7933	9,989	8,81	2,85	0,4100	0,4104076	7034	8209,459
319	ECO	13,00	49,9	149,7	9047,00316	8957	9978	10,323	8,98	2,85	0,4213	0,41921781	10656	12289,12
320	ECO	9,93	49,8	150,5	6271,94862	6402	6904	10,777	9,71	2,85	0,4541	0,45883317	6183	8535,097
321	ECO	10,57	49,8	150,7	4102,65398	4161	4519	9,889	8,84	2,85	0,4133	0,41628442	4179	4859,407
322	ECO	10,47	50,3	150,2	5510,80402	5595	6066	10,879	9,74	2,85	0,4523	0,45578535	5964	7308,163
323	ECO	12,23	49,8	150,6	7684,03151	7666	8478	9,921	8,71	2,85	0,4079	0,40740868	7706	8576,765



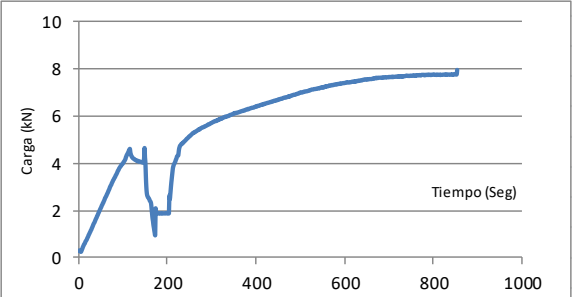
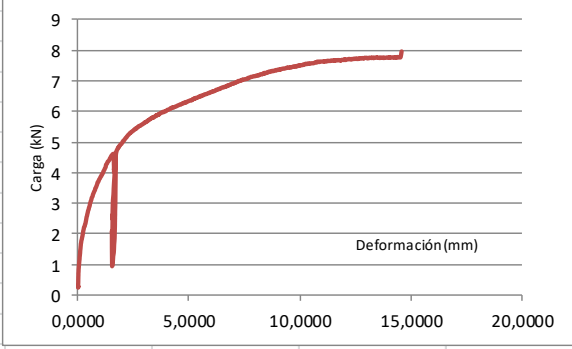
## Anexo B

### Ensayos probetas con cargas paralela y perpendicular a las fibras

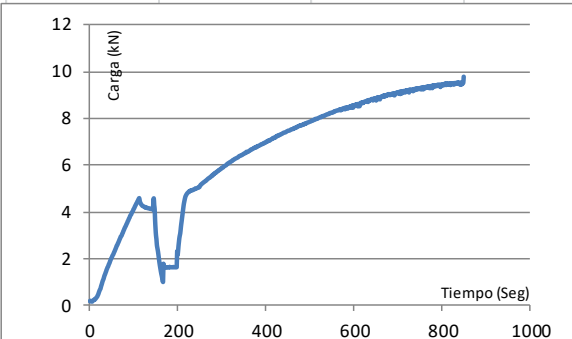
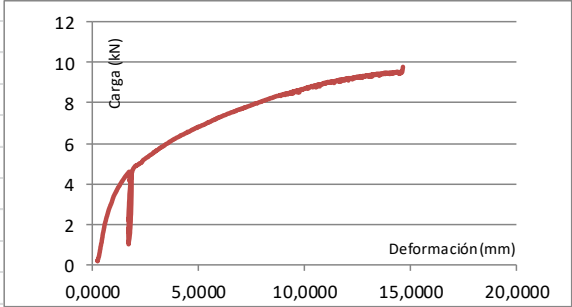
#### 1. Ensayos de probetas con cargas paralelas a las fibras. (PA50)



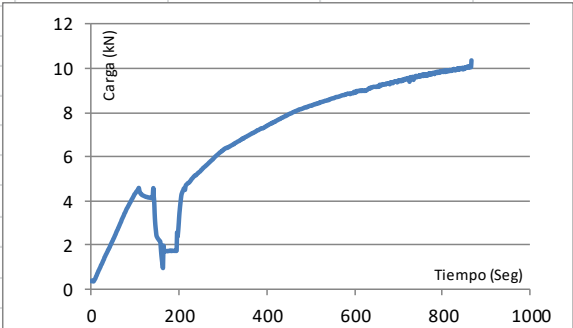
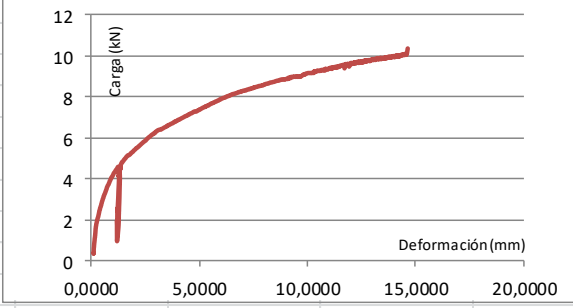
PA50-03		
carga max estimada	11,5	Kn
deslizamiento inicial	1,6155	mm
deslizamiento inicial modificado	2,0560	mm
asiento de la unión	-0,4405	mm
deslizamiento elástico	0,1827	mm
módulo de deslizamiento inicial	2,8474	KN/mm
módulo de deslizamiento	2,2374	KN/mm
deslizamiento a 0,6 Fmáx	7,0035	mm
deslizamiento modificado a 0,6 Fmáx	7,3410	mm
deslizamiento a 0,8 Fmáx	14,586	mm
deslizamiento modificado a 0,8 Fmáx	14,9235	mm

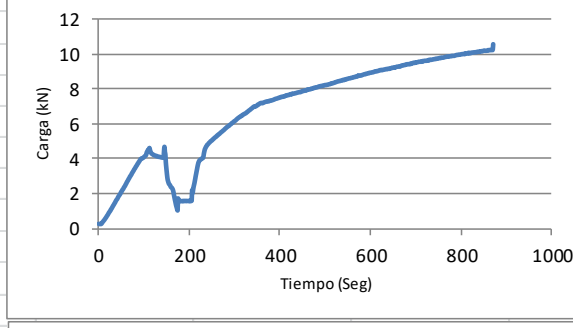
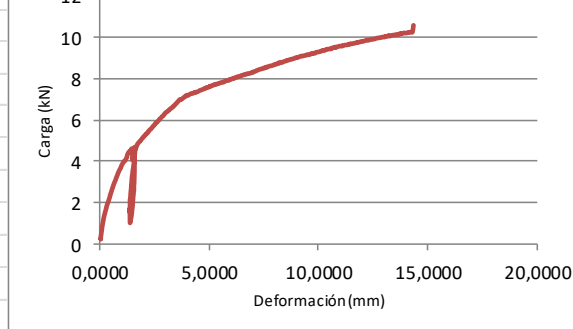
PA50-04		
carga max estimada	11,5	Kn
deslizamiento inicial	1,7375	mm
deslizamiento inicial modificado	1,7307	mm
asiento de la unión	0,0068	mm
deslizamiento elástico	0,1923	mm
módulo de deslizamiento inicial	2,6475	KN/mm
módulo de deslizamiento	2,6579	KN/mm
deslizamiento a 0,6 Fmáx	5,195	mm
deslizamiento modificado a 0,6 Fmáx	5,0457	mm
deslizamiento a 0,8 Fmáx	11,9635	mm
deslizamiento modificado a 0,8 Fmáx	11,8142	mm

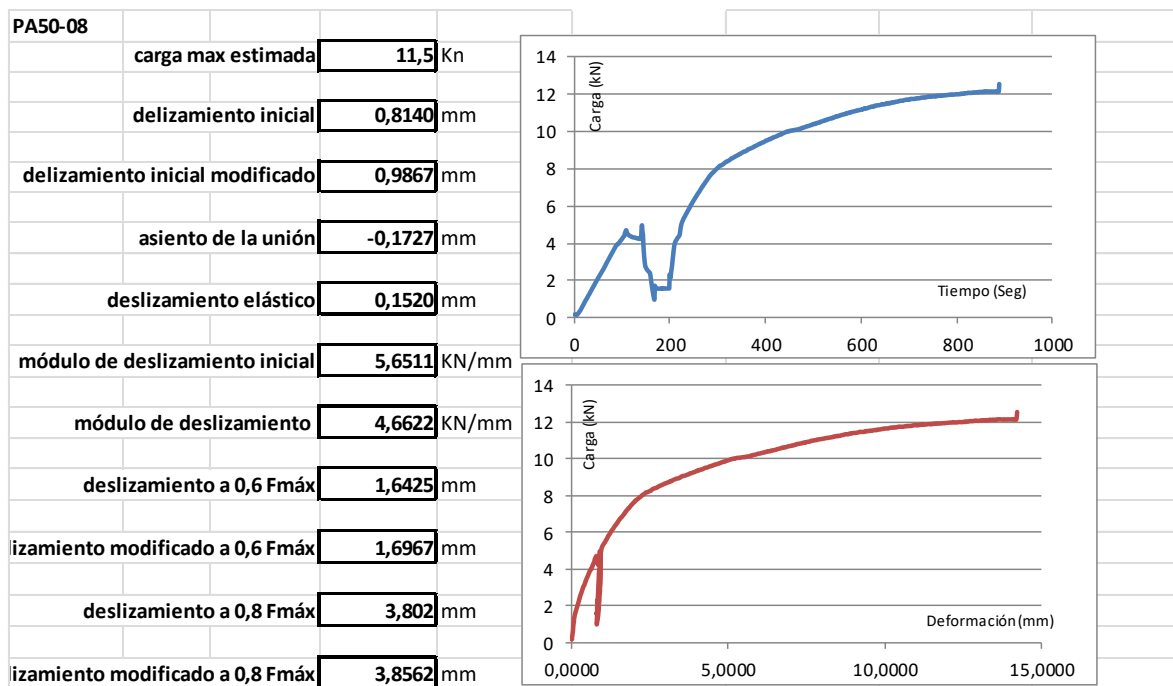
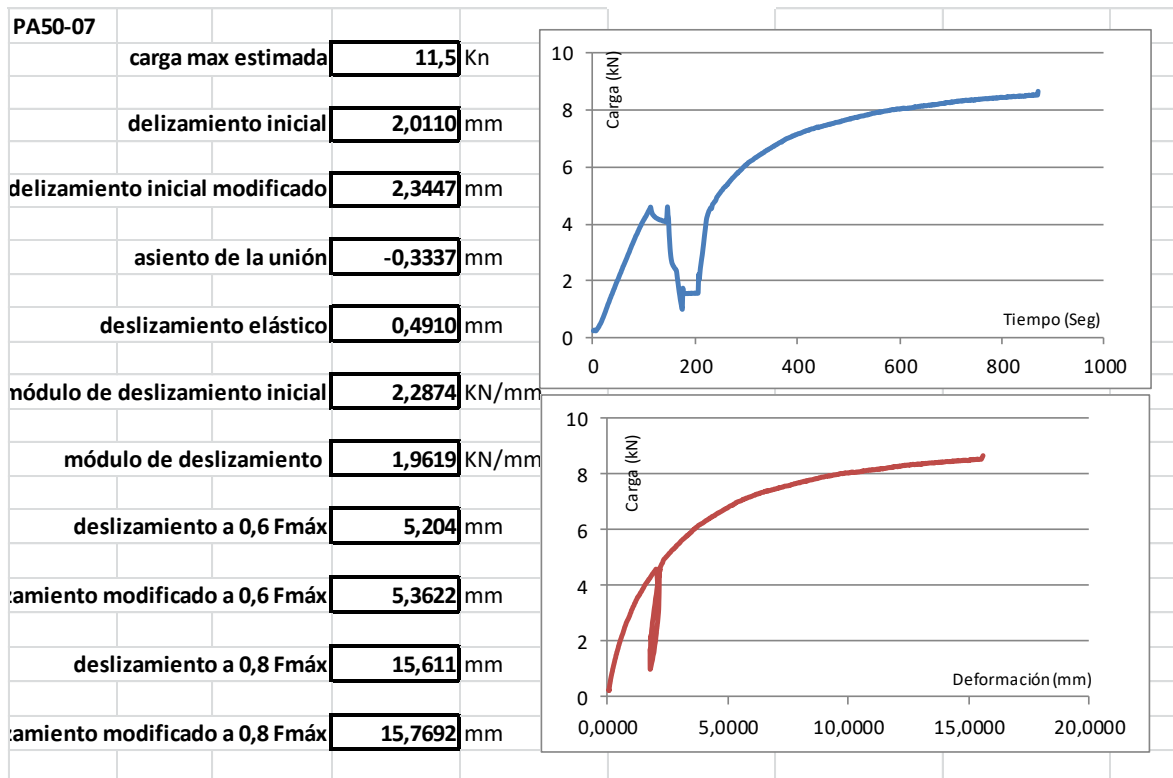



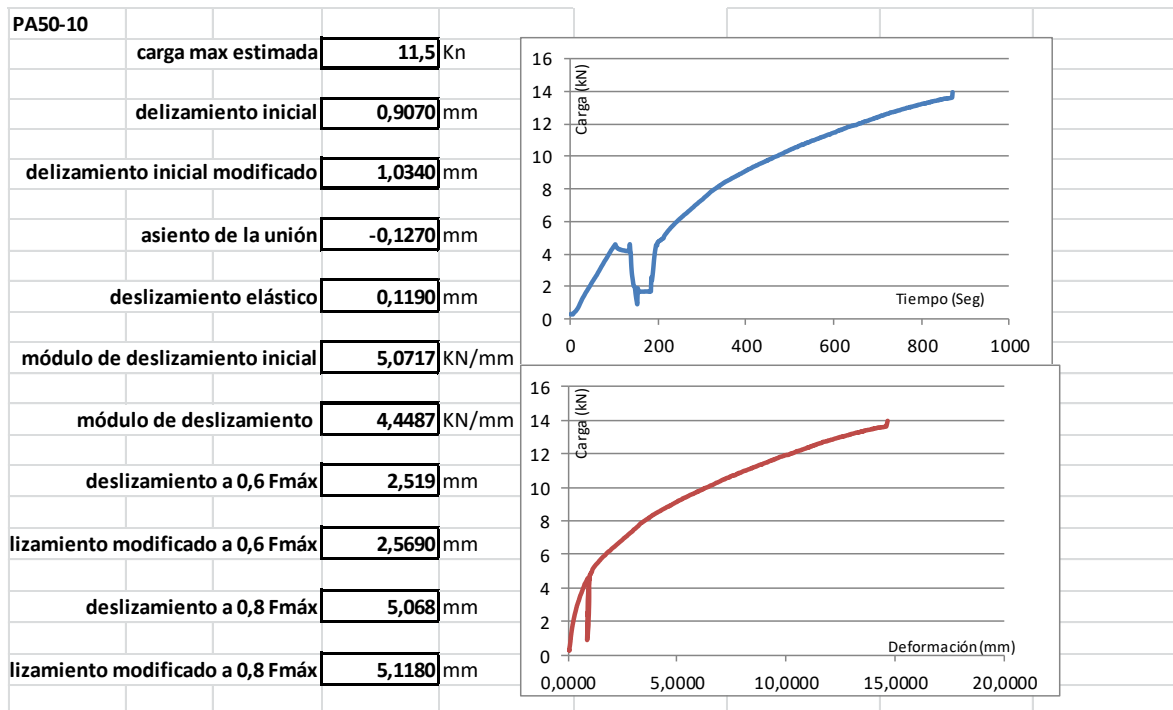
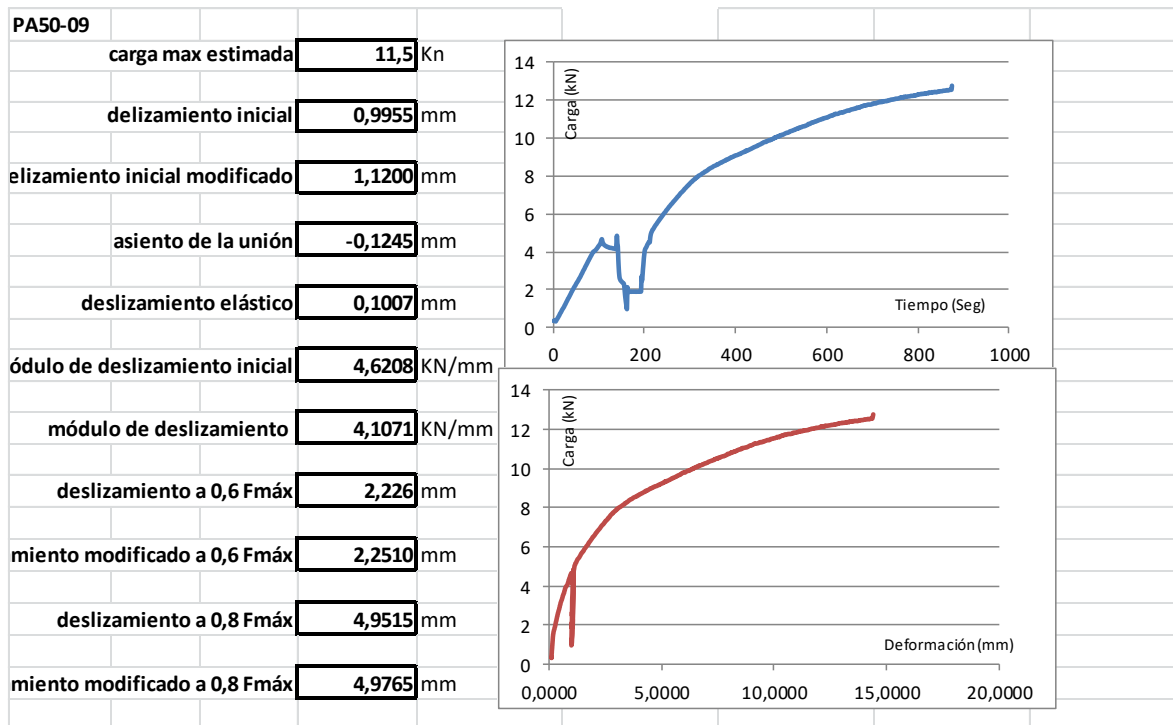
PA50-05	
carga max estimada	11,5 Kn
deslizamiento inicial	1,2560 mm
deslizamiento inicial modificado	1,4260 mm
asiento de la unión	-0,1700 mm
deslizamiento elástico	0,1723 mm
módulo de deslizamiento inicial	3,6624 KN/mm
módulo de deslizamiento	3,2258 KN/mm
deslizamiento a 0,6 Fmáx	4,0655 mm
deslizamiento modificado a 0,6 Fmáx	4,1160 mm
deslizamiento a 0,8 Fmáx	10,3255 mm
deslizamiento modificado a 0,8 Fmáx	10,3760 mm

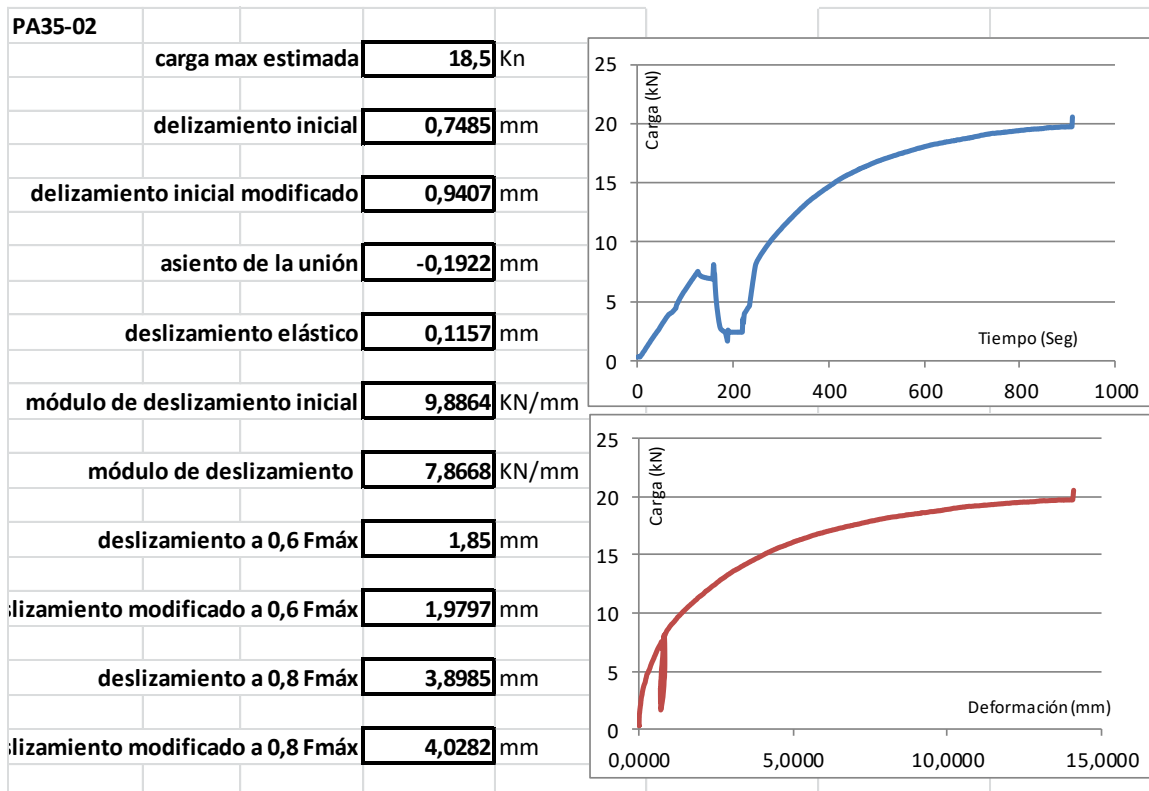
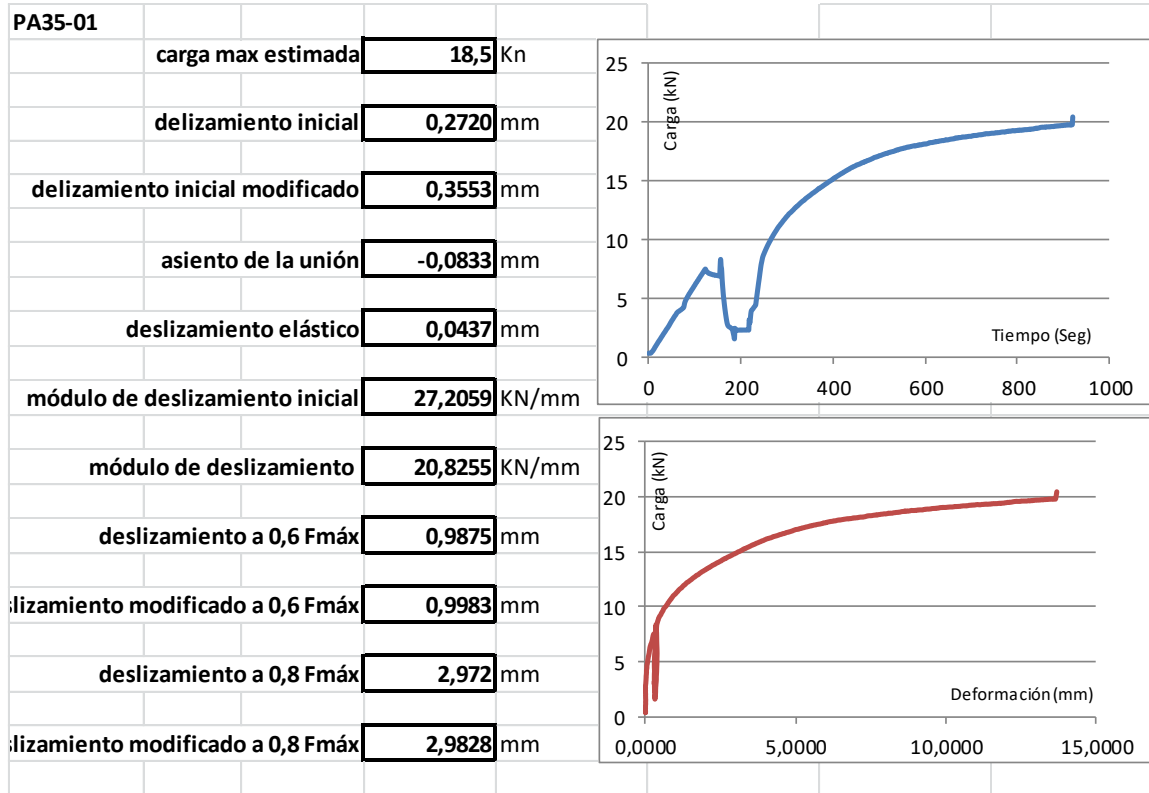
PA50-06	
carga max estimada	11,5 Kn
deslizamiento inicial	1,4575 mm
deslizamiento inicial modificado	1,7247 mm
asiento de la unión	-0,2672 mm
deslizamiento elástico	0,3100 mm
módulo de deslizamiento inicial	3,1561 KN/mm
módulo de deslizamiento	2,6672 KN/mm
deslizamiento a 0,6 Fmáx	3,577 mm
deslizamiento modificado a 0,6 Fmáx	3,6492 mm
deslizamiento a 0,8 Fmáx	9,6425 mm
deslizamiento modificado a 0,8 Fmáx	9,7147 mm

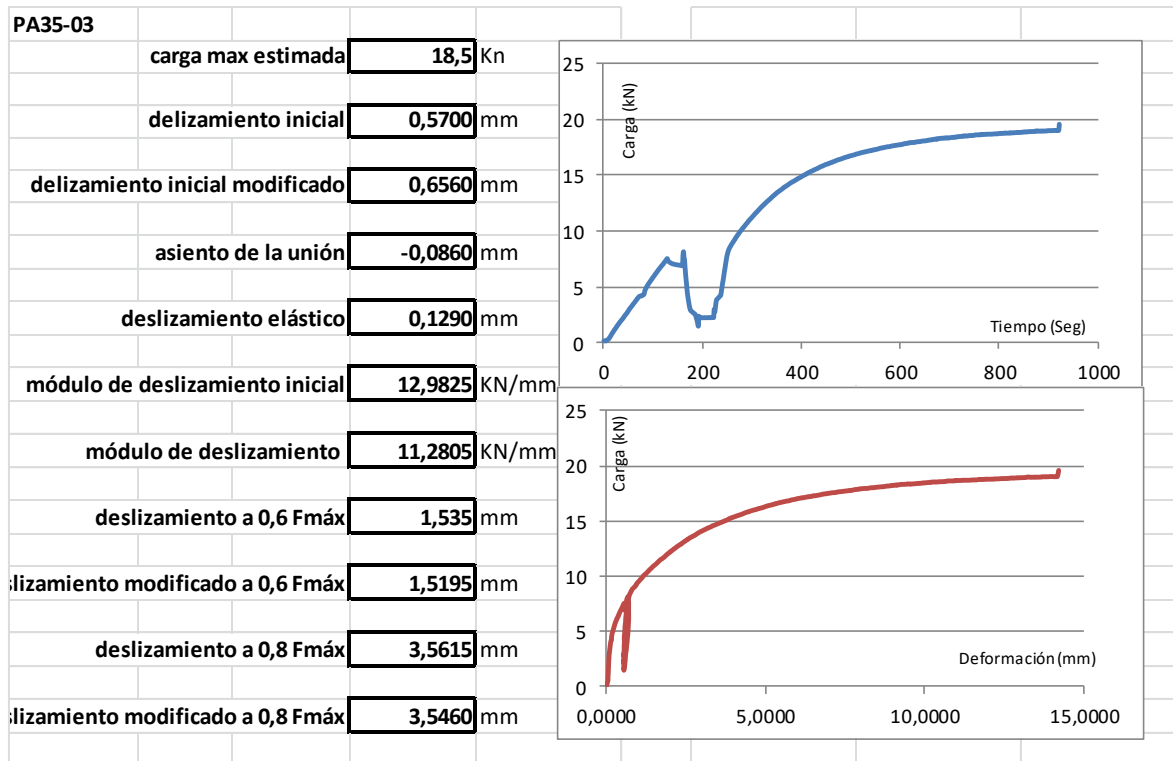
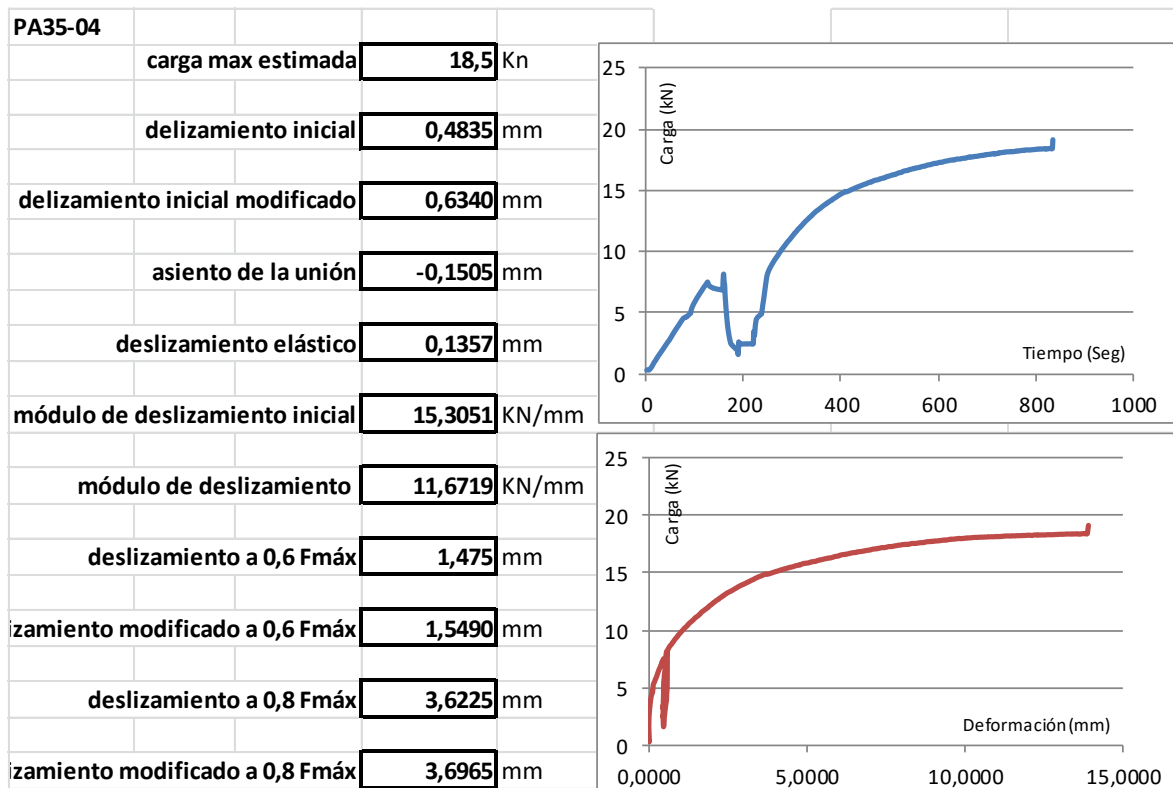



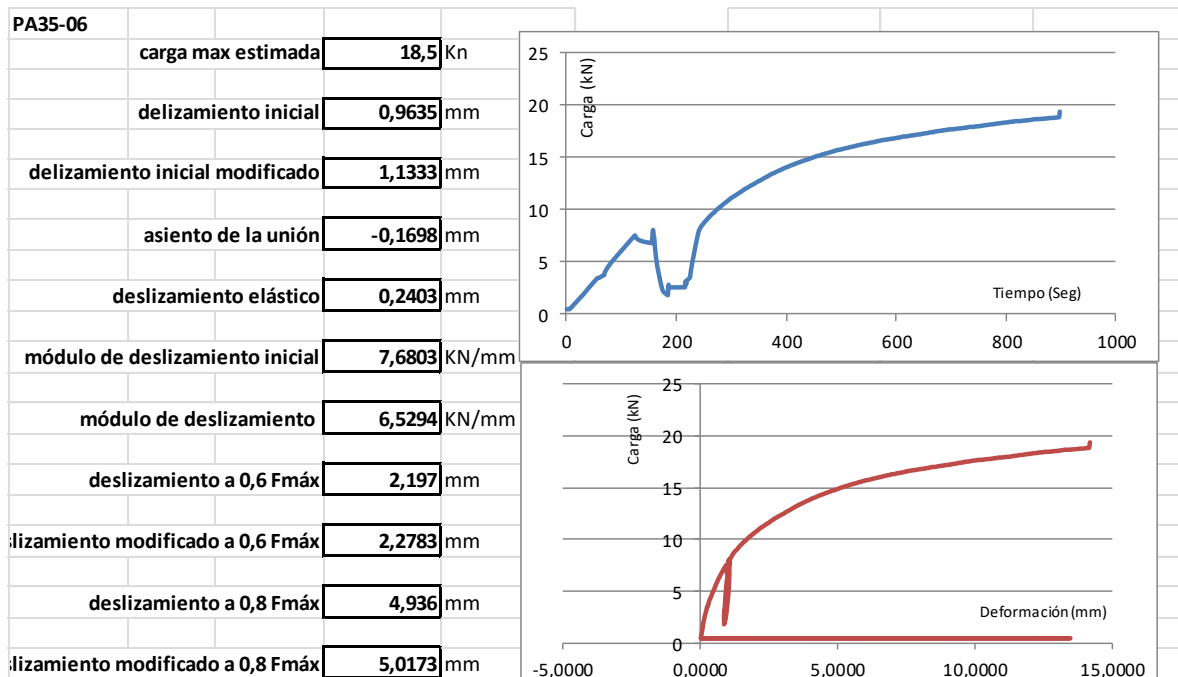
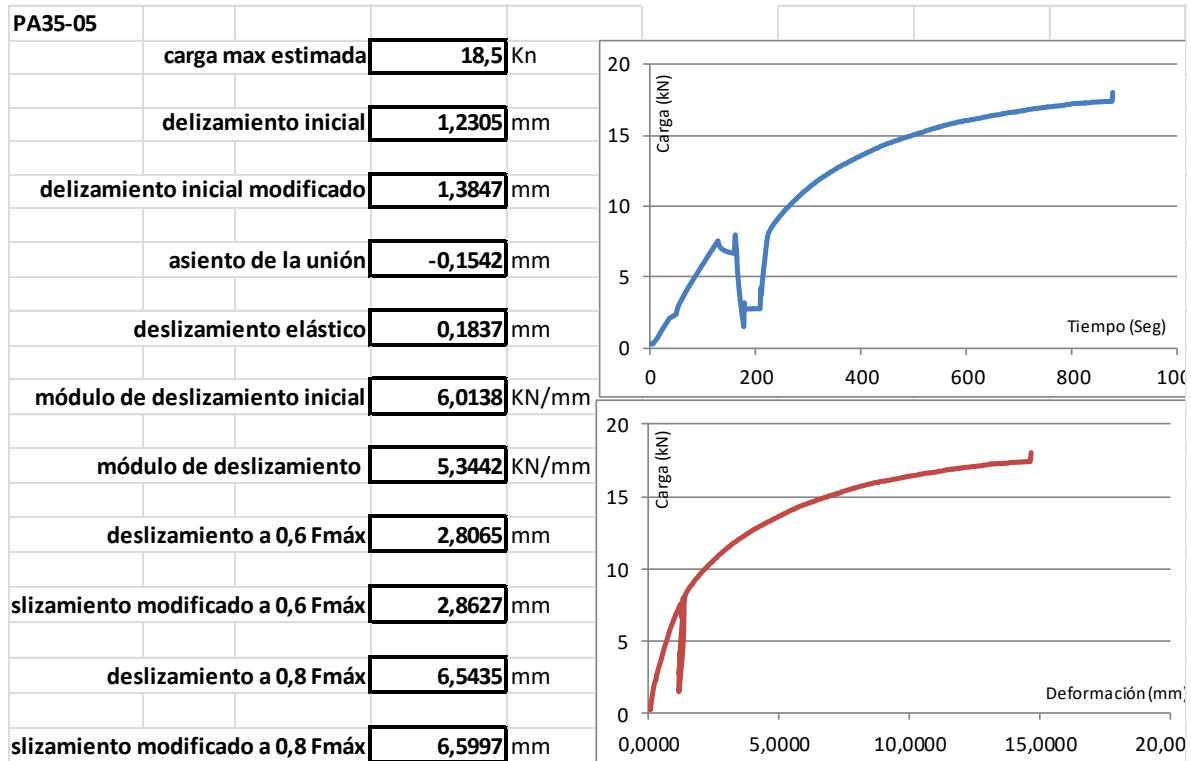




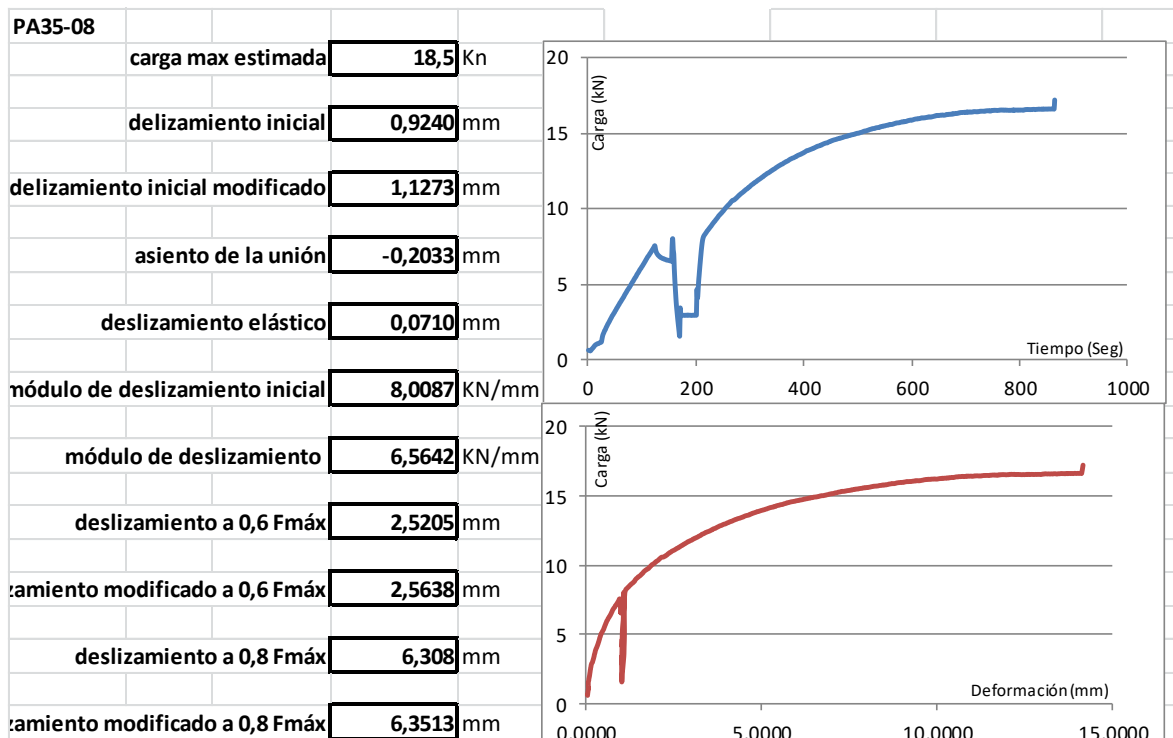
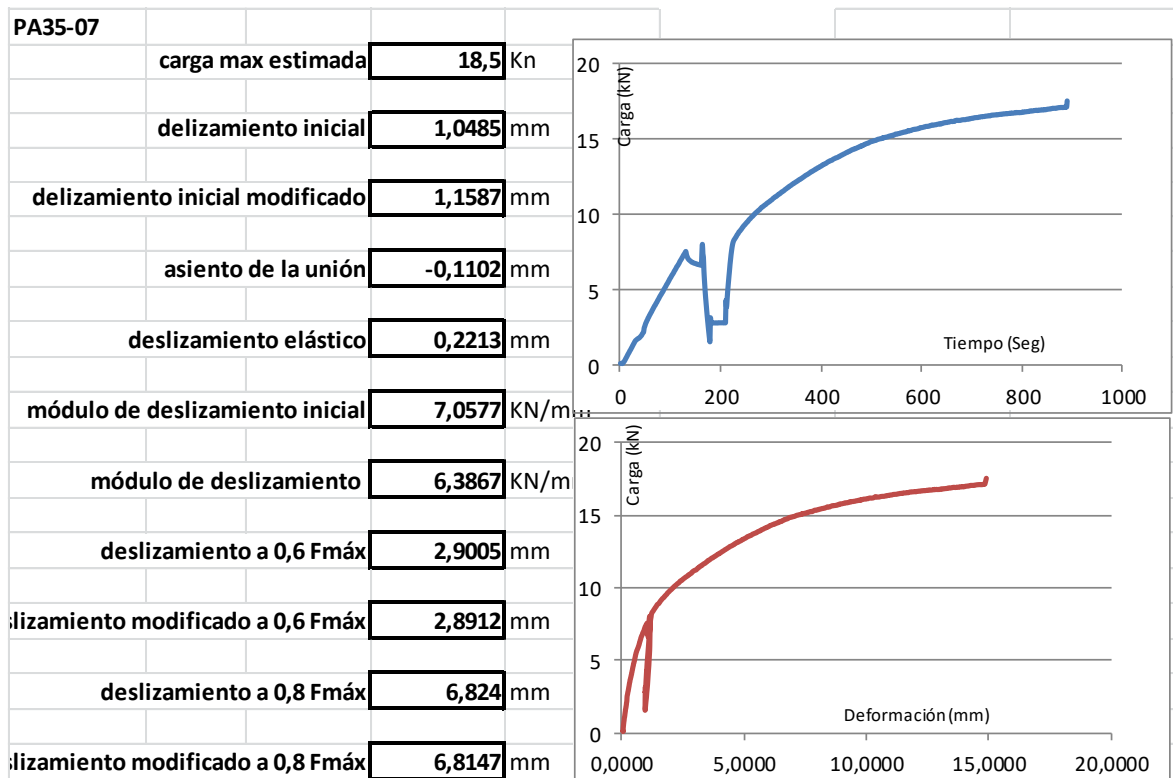
## 2. Ensayos de probetas con cargas paralelas a las fibras. (PA35)

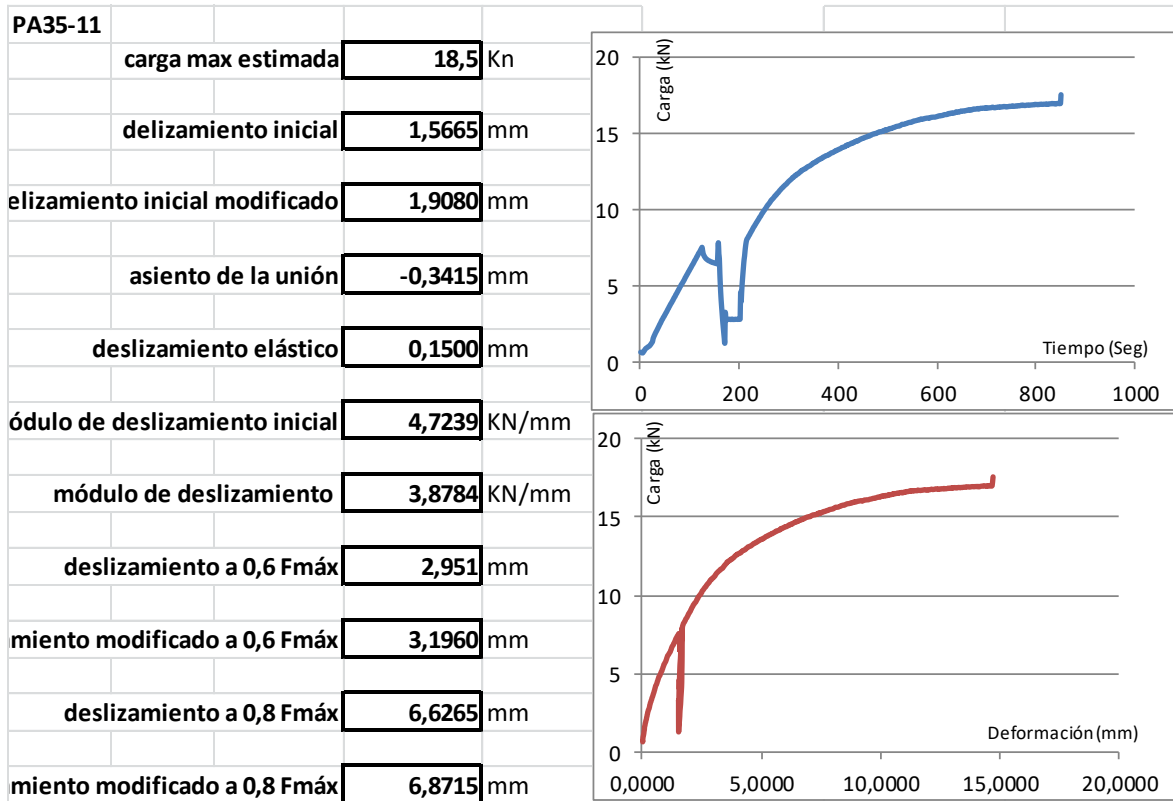
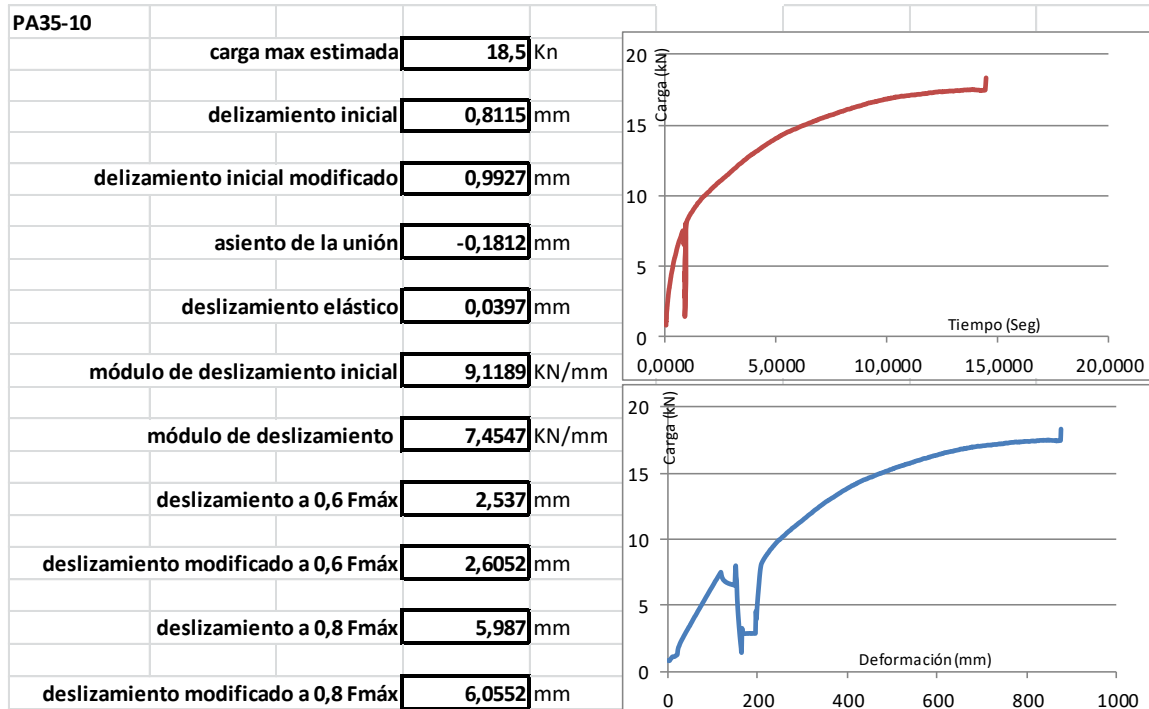






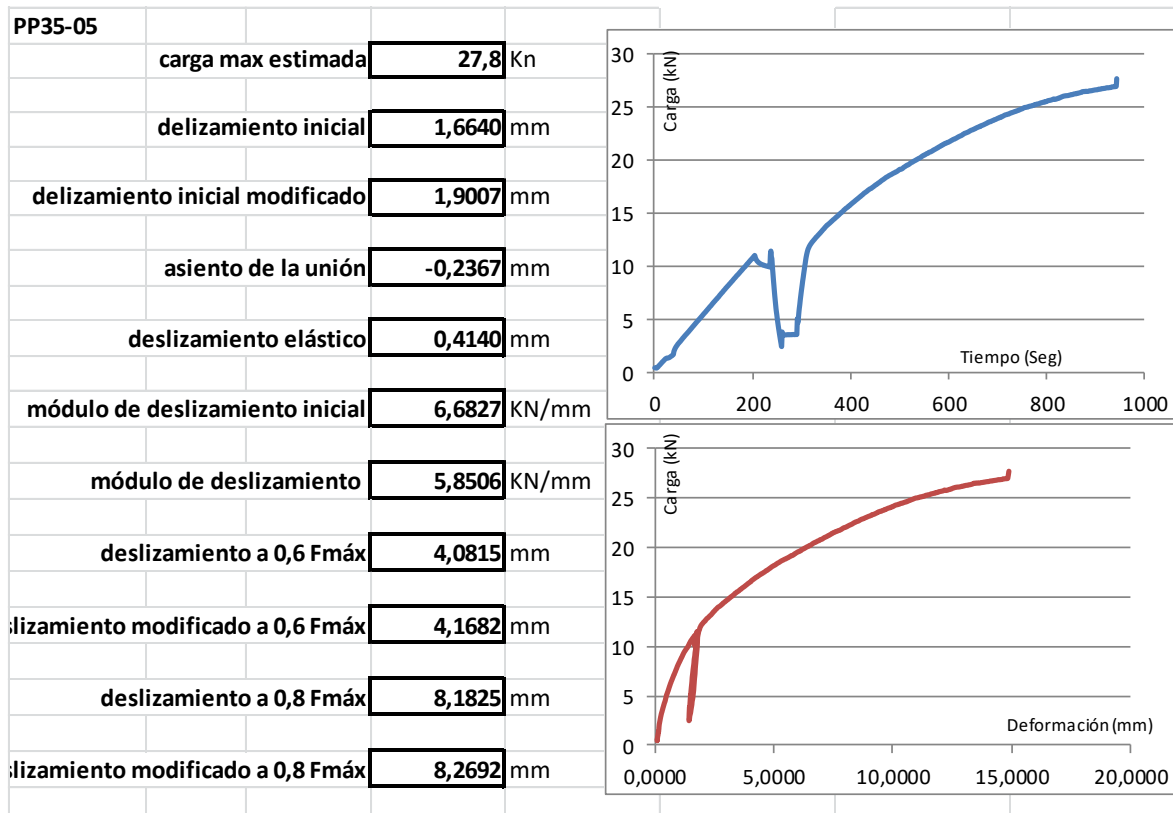
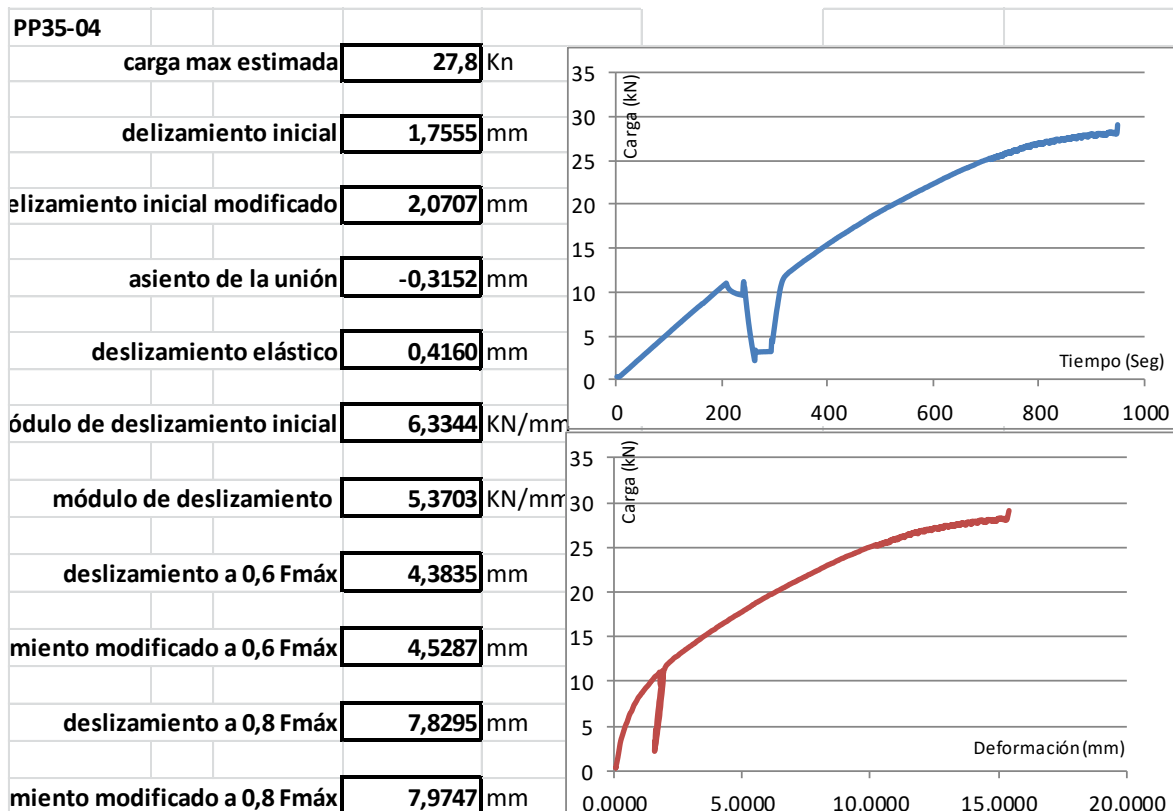


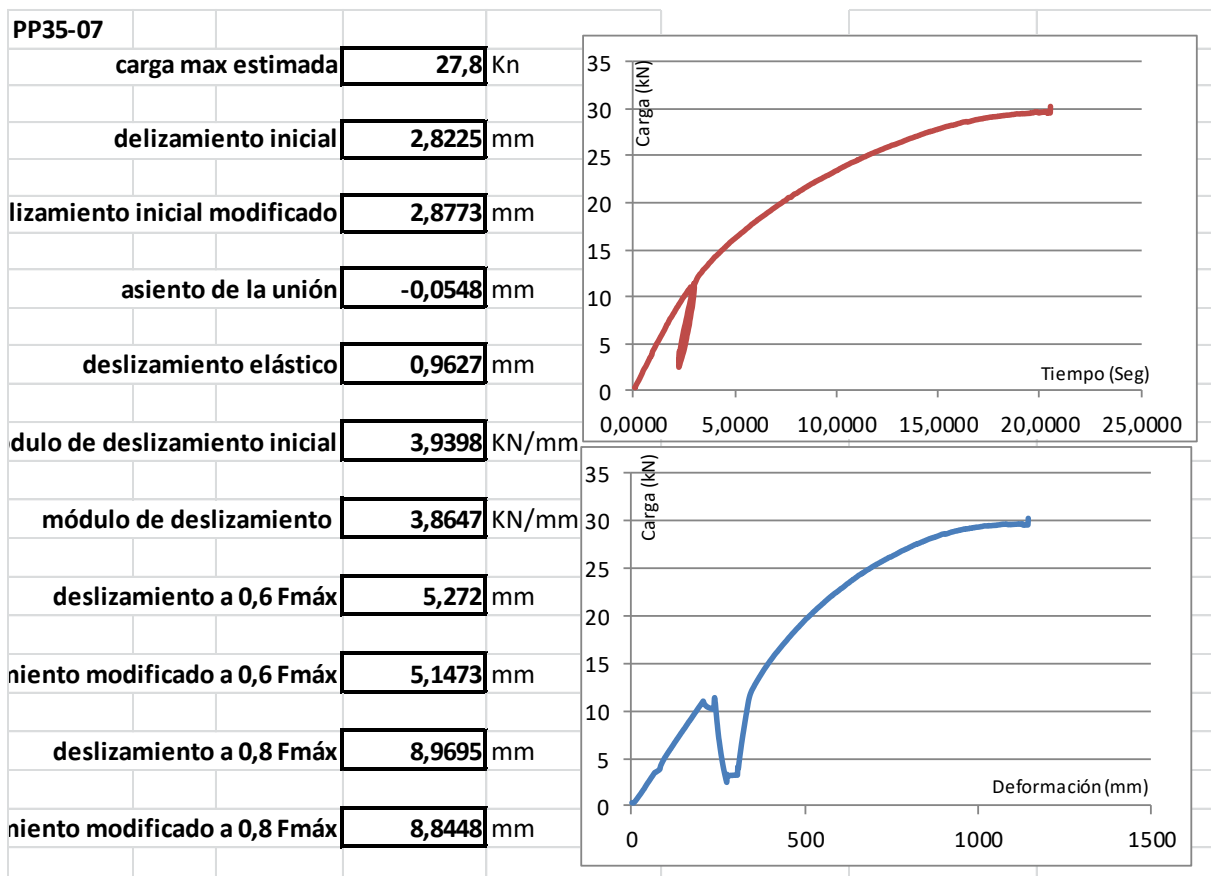
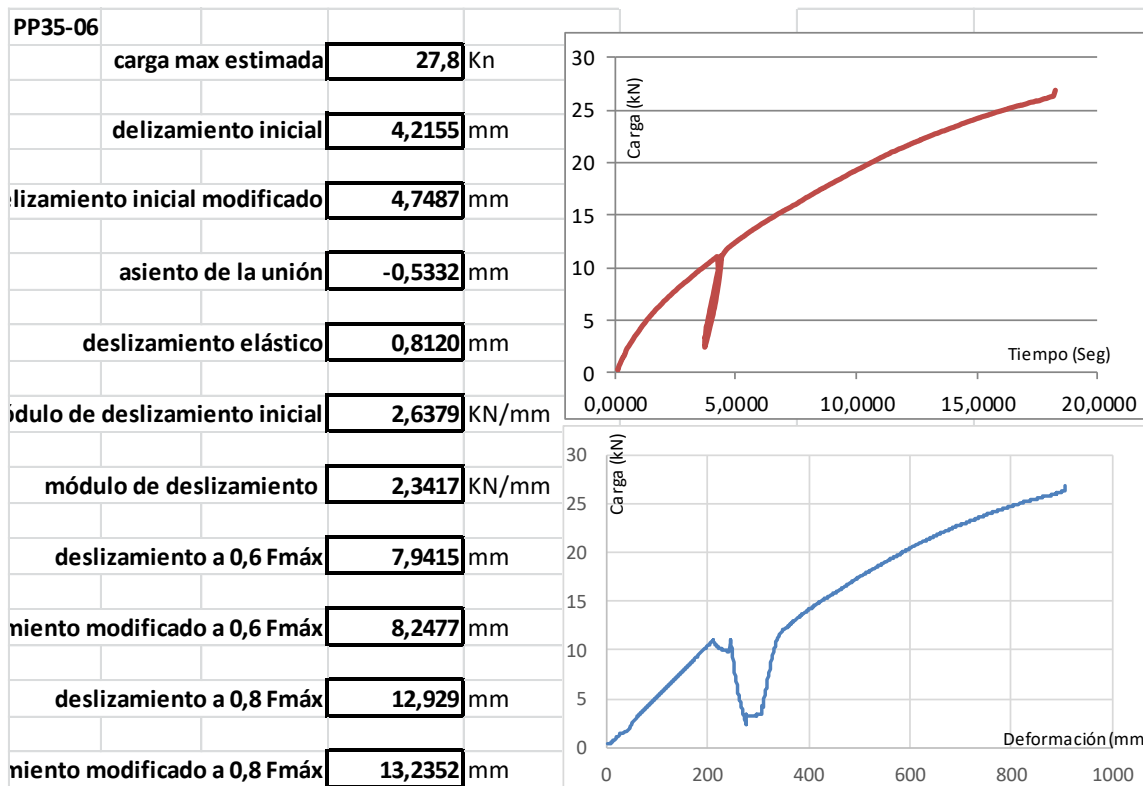


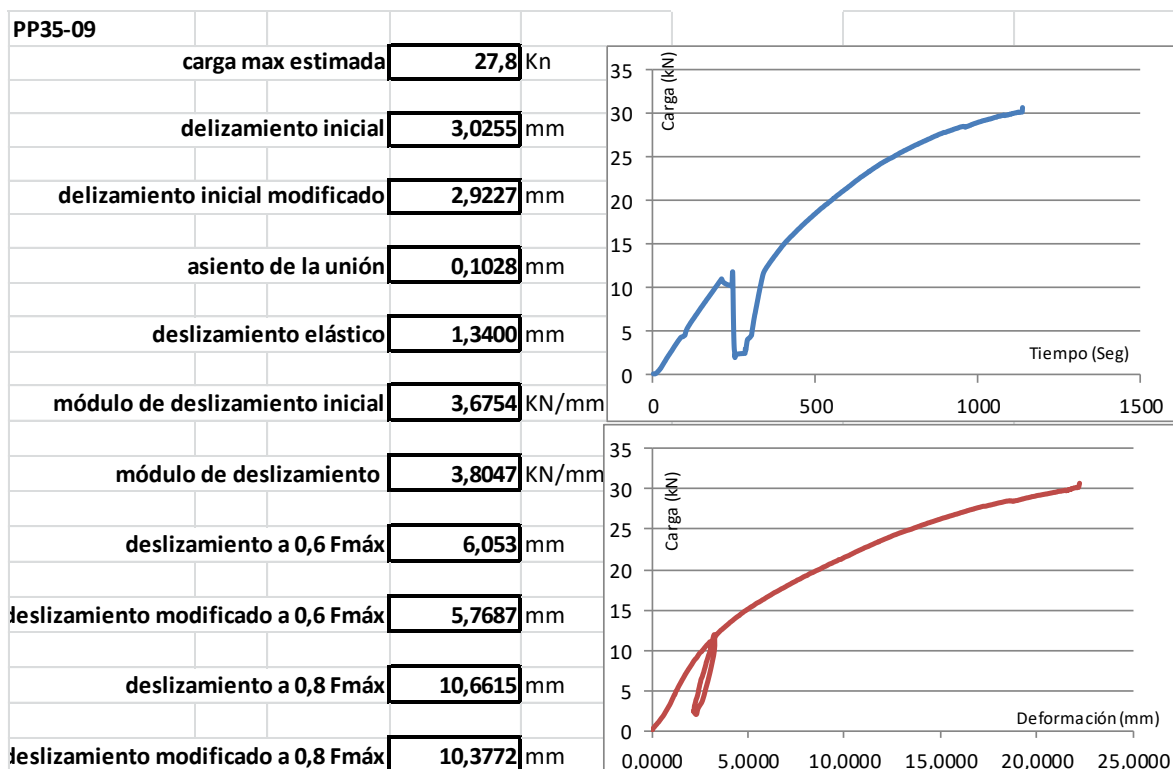
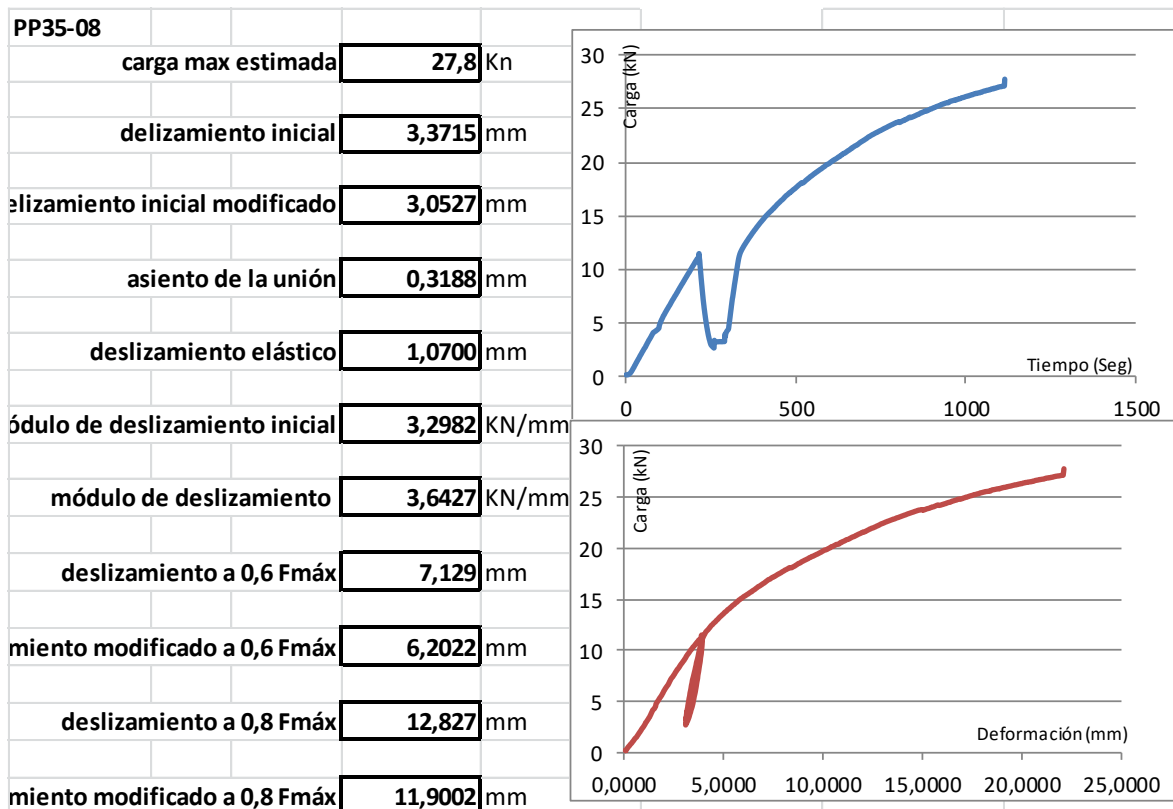


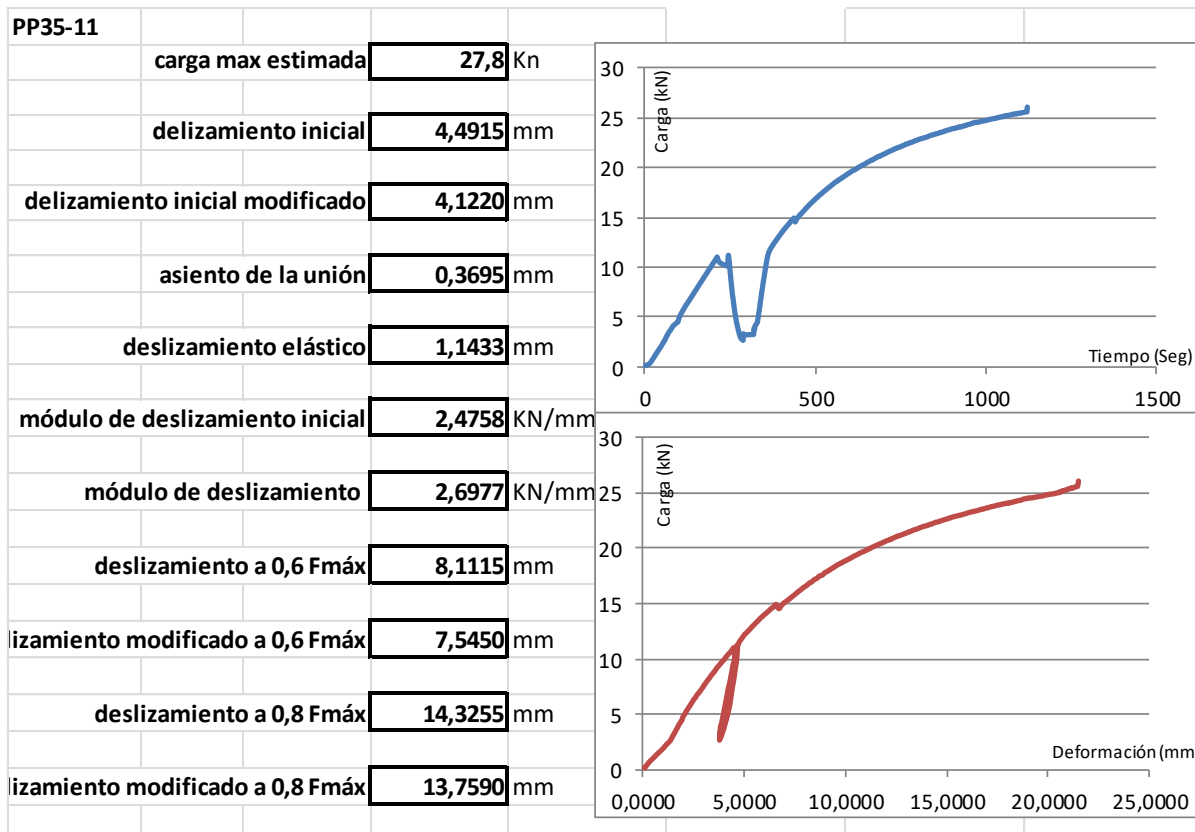
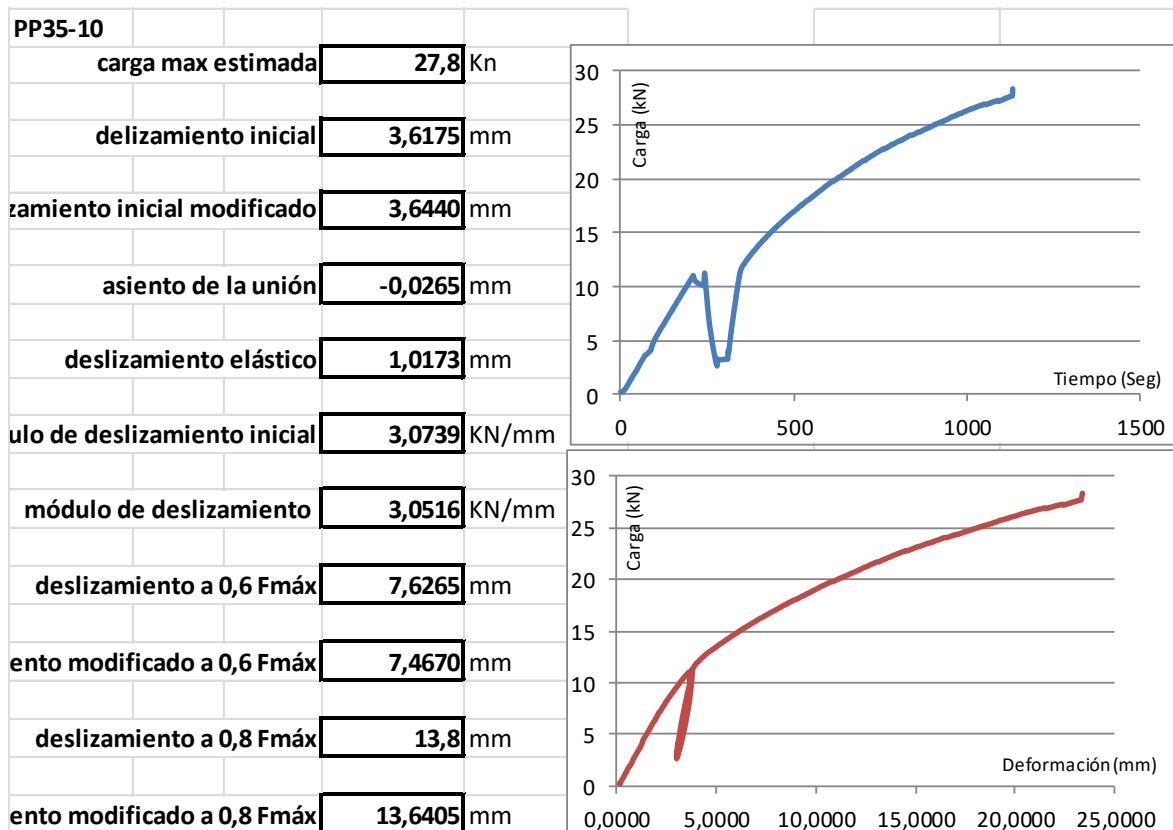
### 3. Ensayos de probetas con cargas perpendiculares a las fibras. (PP35)

<b>PP35-02</b>				
carga max estimada	27,8	Kn		
deslizamiento inicial	2,3235	mm		
deslizamiento inicial modificado	2,6187	mm		
asiento de la unión	-0,2952	mm		
deslizamiento elástico	0,7103	mm		
módulo de deslizamiento inicial	4,7859	KN/mm		
módulo de deslizamiento	4,2464	KN/mm		
deslizamiento a 0,6 Fmáx	5,292	mm		
deslizamiento modificado a 0,6 Fmáx	5,4427	mm		
deslizamiento a 0,8 Fmáx	9,9465	mm		
deslizamiento modificado a 0,8 Fmáx	10,0972	mm		
<b>PP35-03</b>				
carga max estimada	27,8	Kn		
deslizamiento inicial	3,4700	mm		
deslizamiento inicial modificado	4,0720	mm		
asiento de la unión	-0,6020	mm		
deslizamiento elástico	0,5563	mm		
módulo de deslizamiento inicial	3,2046	KN/mm		
módulo de deslizamiento	2,7308	KN/mm		
deslizamiento a 0,6 Fmáx	7,7335	mm		
deslizamiento modificado a 0,6 Fmáx	8,1060	mm		
deslizamiento a 0,8 Fmáx	15,094	mm		
deslizamiento modificado a 0,8 Fmáx	15,4665	mm		

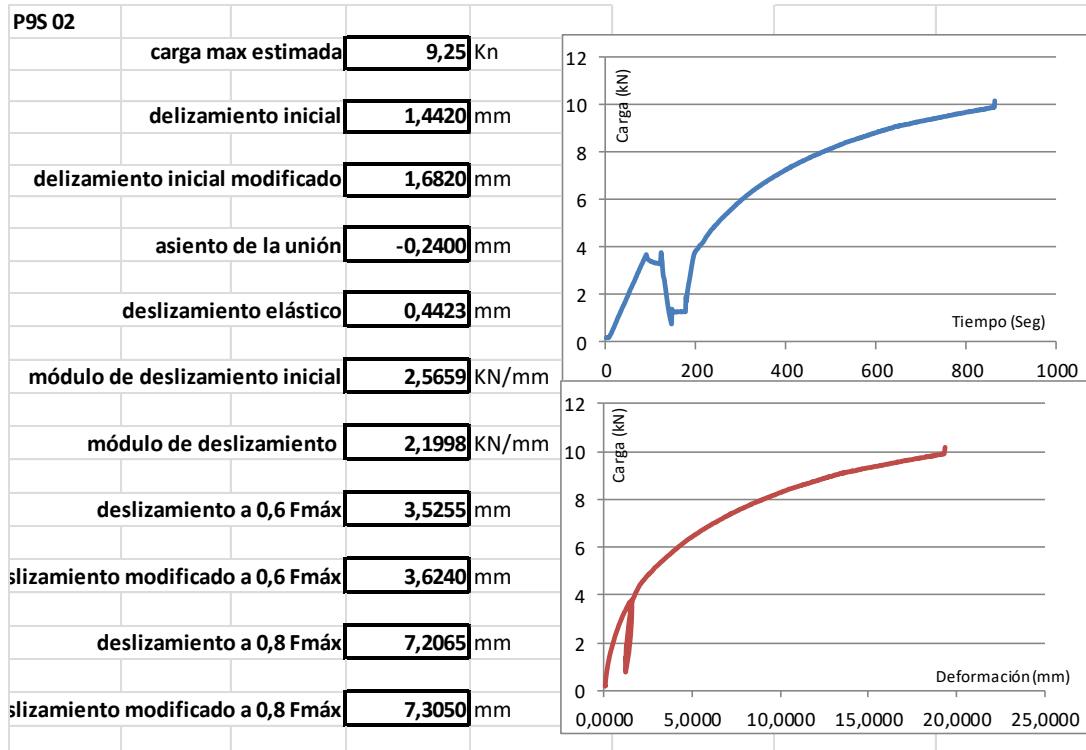
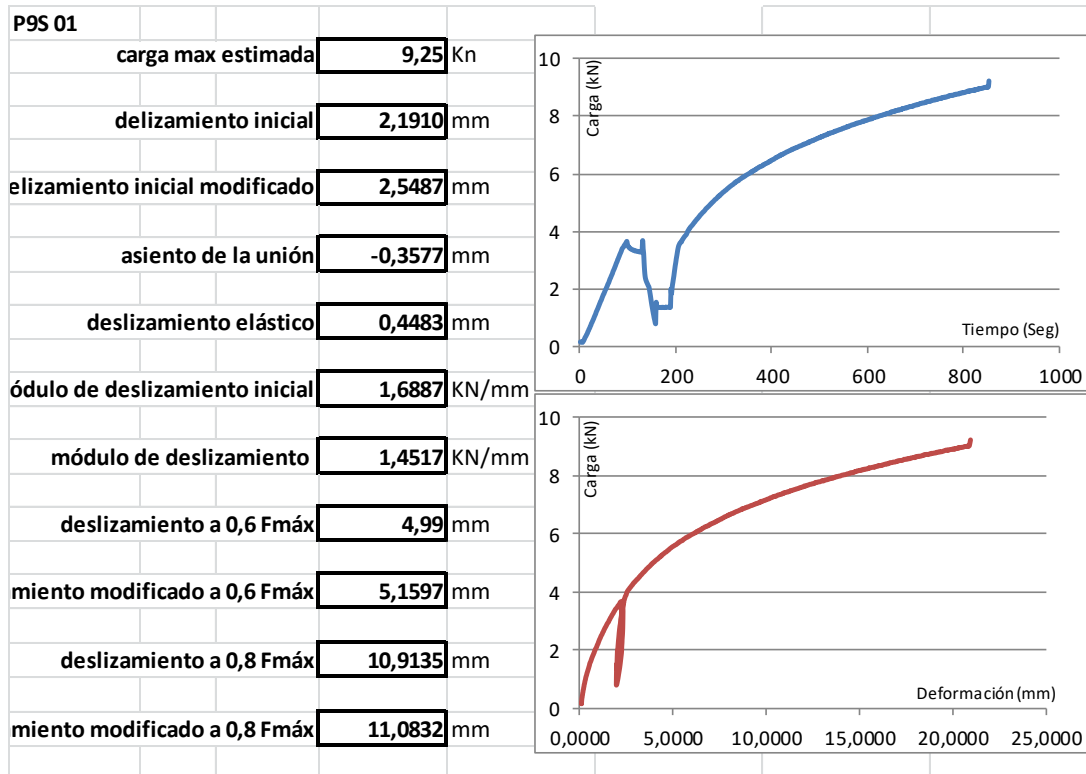




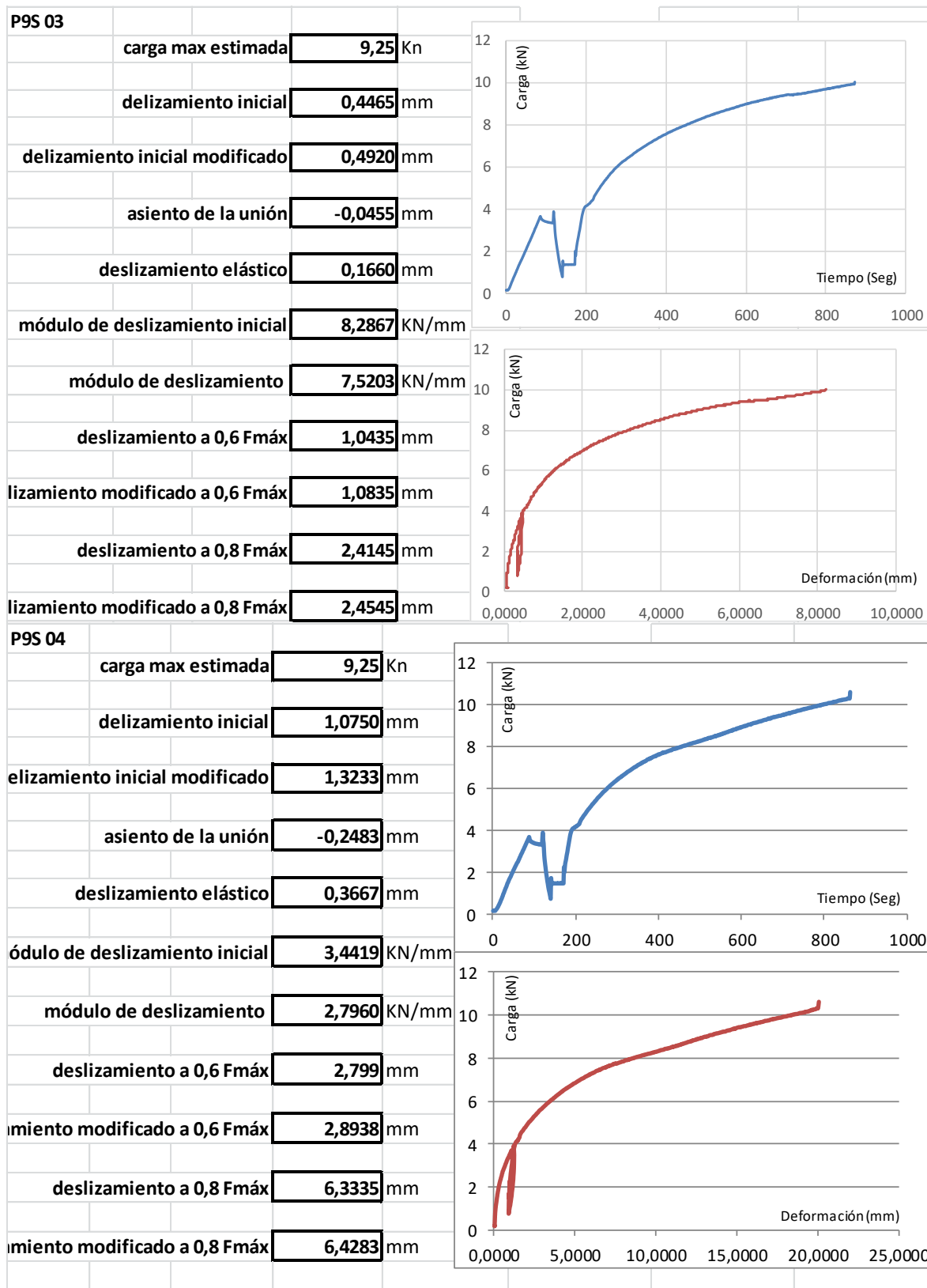


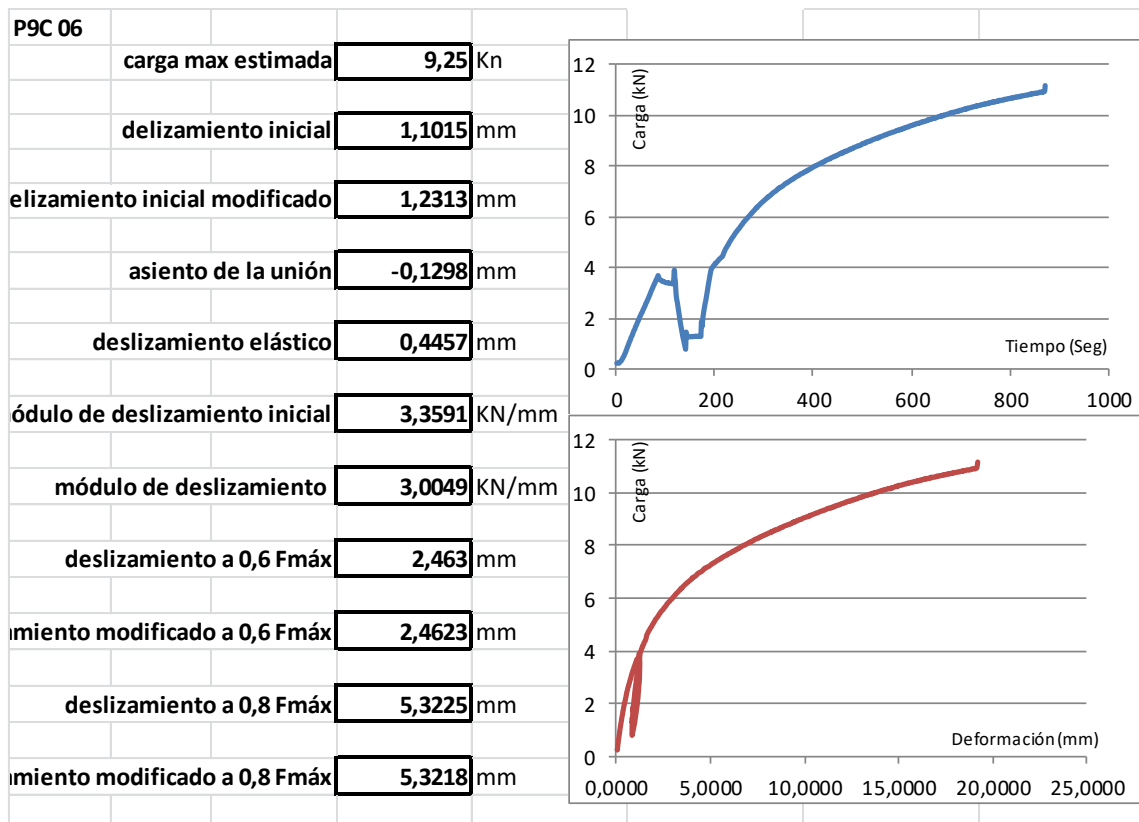
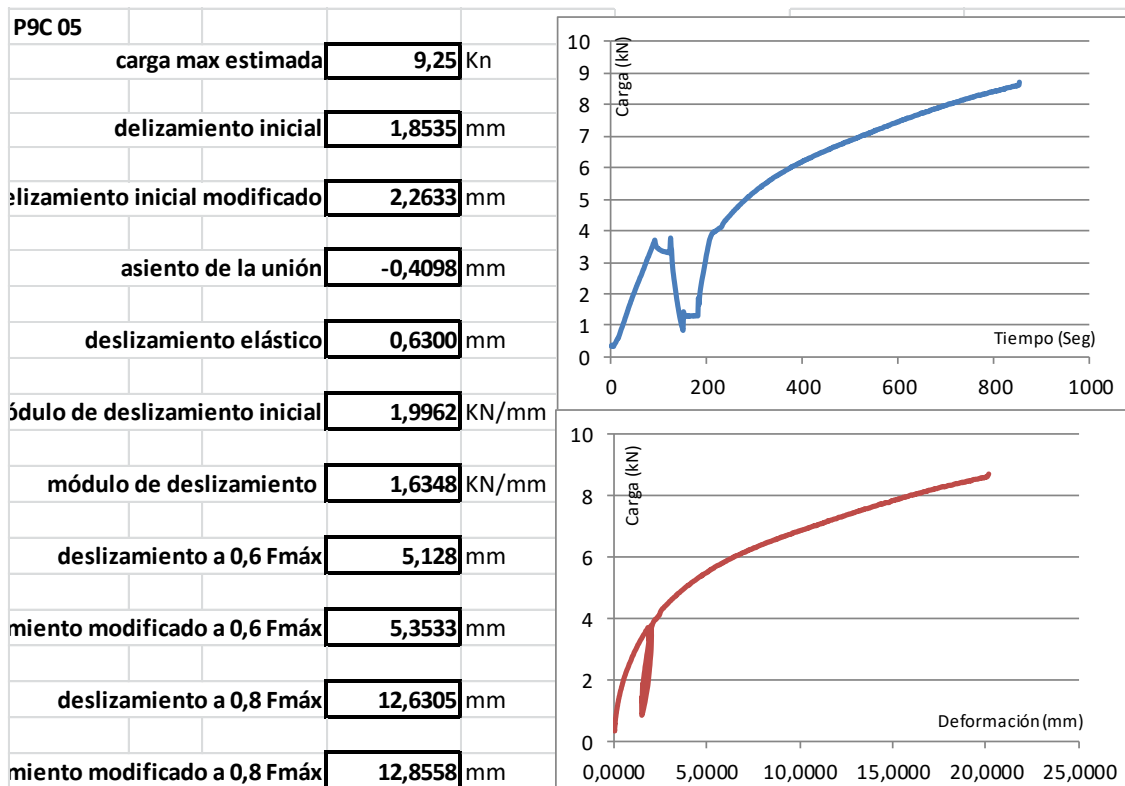


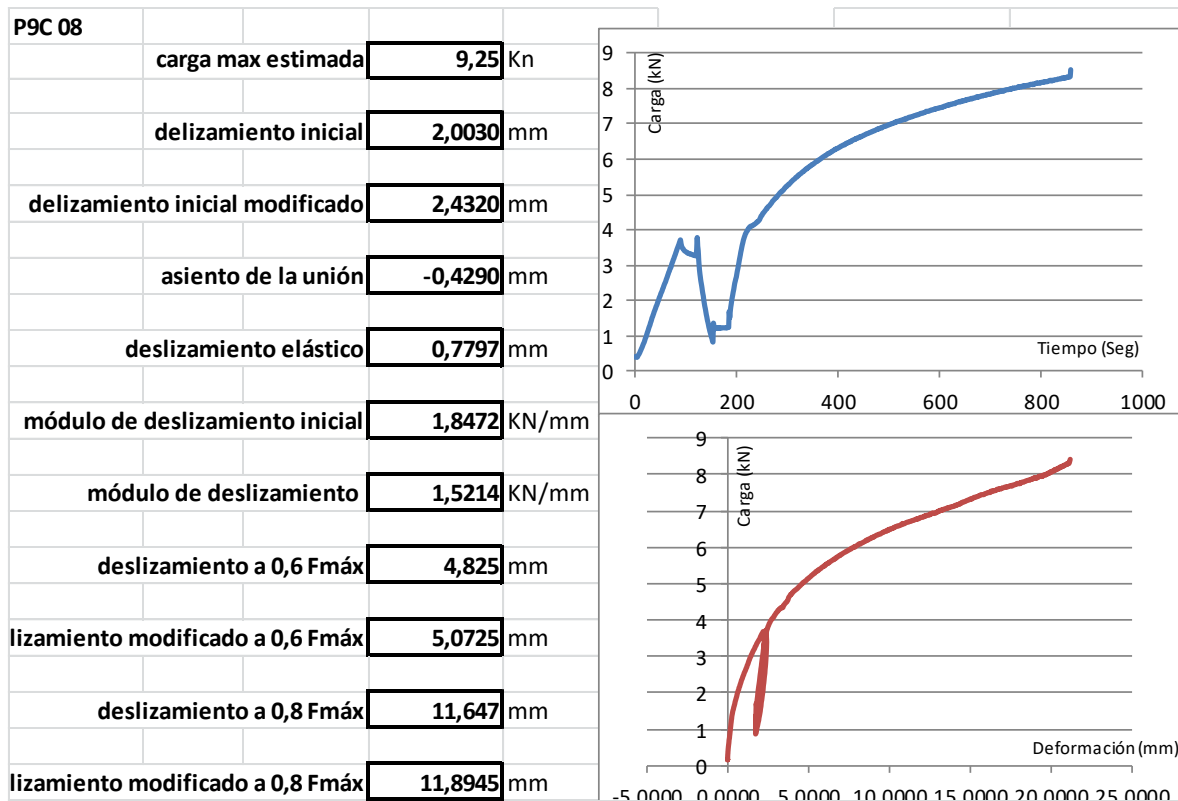
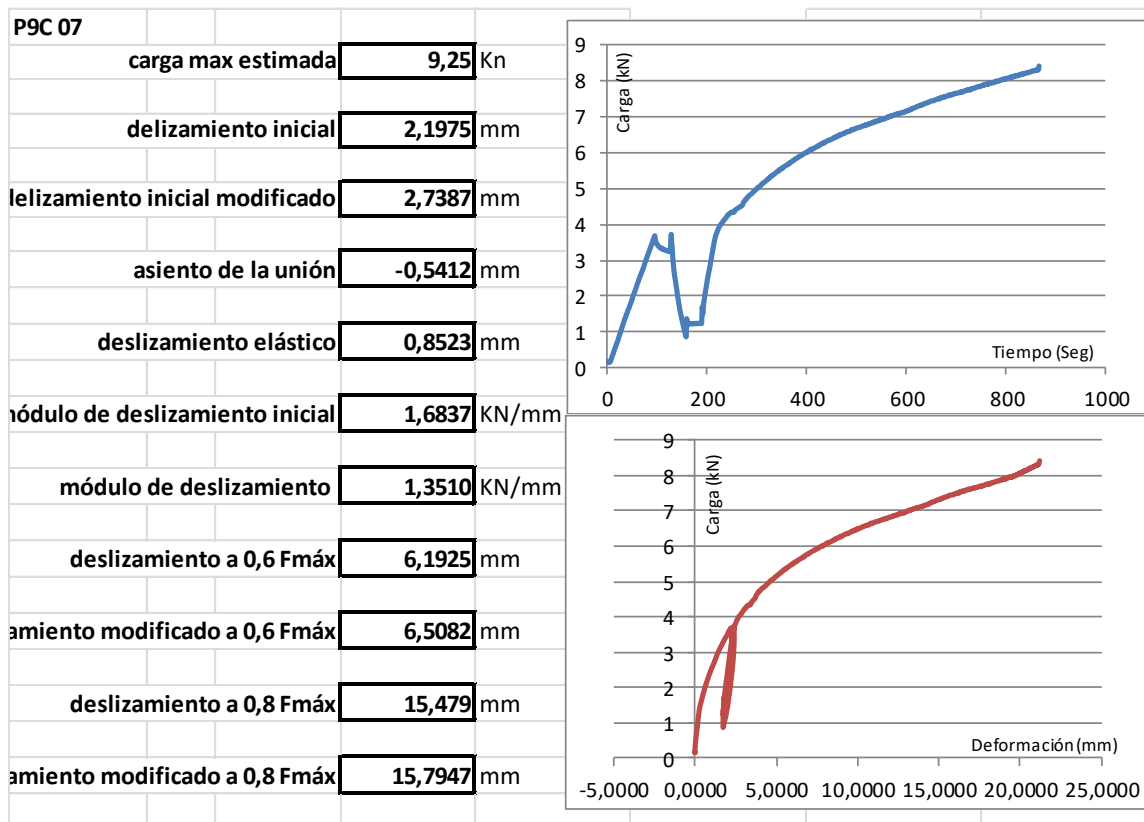
4. Ensayos de probetas de 9 tablas con cargas paralelas a las fibras.











## ANEXO C

### CÁLCULO RESISTENCIA LOSA (PLACA NLT)

#### 3.1. COMPROBACIONES EN ELU- Flexión simple

Se debe verificar que:

$$\sigma_{m,d} = M_d / W_y \leq f_{m,d} = k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \times k_h \times k_{sys}$$

$\sigma_{m,d}$	Tensión de cálculo a flexión	$f_{m,d}$	Resistencia de cálculo a flexión
$M_d$	Momento flector de cálculo	$f_{m,k}$	Resistencia característica a flexión
$W_y$	Módulo resistente	$k_{mod}$	Duración de la carga Clase de servicio
$W_y = b \cdot h^2 / 6$ (sección rectangular)		$\gamma_M$	Coef parcial de seguridad material

Combinación 1:

$$f_{m,d} = 0,6 \times \frac{14}{1,3} \times 1 \times 1,1 = 7,11 \text{ N/mm}^2$$

Combinación 2:

$$f_{m,d} = 0,8 \times \frac{14}{1,3} \times 1 \times 1,1 = 9,48 \text{ N/mm}^2$$

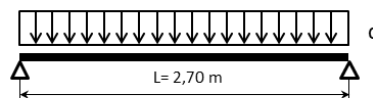
#### • Solicitaciones- Momento flector

##### 1- Cálculo de cargas y combinaciones de cargas

- $qg = 0,90 \text{ kN/m}^2 \times 1,0 \text{ m} = 0,90 \text{ kN/m} \rightarrow \gamma F = 1,35$  (acciones permanentes)
- $qq = 2,0 \text{ kN/m}^2 \times 1,0 \text{ m} = 2,0 \text{ kN/m} \rightarrow \gamma F = 1,5$  (acciones variables)

##### combinaciones de cargas

- Combinación 1:  $1,35 \times qg$
- Combinación 2:  $1,35 \times qg + 1,50 \times qq$



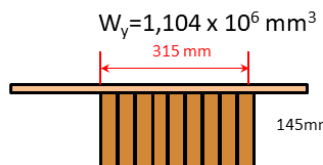
3.2.

##### 2- Momento flector de cálculo

- Combinación 1:  
 $M_d = 1,35 (0,90 \times 2,70^2 / 8) = 1,11 \text{ kN.m} = 1,107 \times 10^6 \text{ N.m}$
- Combinación 2:  
 $M_d = 1,35 (0,90 \times 2,70^2 / 8) + 1,5 (2,0 \times 2,70^2 / 8) = 3,84 \text{ kN.m} = 3,84 \times 10^6 \text{ N.m}$

##### 3- Tensión de cálculo en flexión

- Combinación 1:  
 $\sigma_{m,d} = 1,107 \times 10^6 / 1,104 \times 10^6 = 1,00 \text{ N/mm}^2$
- Combinación 2:  
 $\sigma_{m,d} = 3,84 \times 10^6 / 1,104 \times 10^6 = 3,48 \text{ N/mm}^2$



- Combinación 1:  $1,00 \text{ N/mm}^2 < f_{m,d} = 0,6 \times \frac{14}{1,3} \times 1 \times 1,1 = 7,11 \text{ N/mm}^2$
- Combinación 2:  $3,48 \text{ N/mm}^2 < f_{m,d} = 0,8 \times \frac{14}{1,3} \times 1 \times 1,1 = 9,48 \text{ N/mm}^2$   
**OK**

115

## COMPROBACIONES EN ELU- cortante

Se debe verificar que:

$$\tau_d \leq f_{v,d} = k_{mod} \times \frac{f_{v,k}}{\gamma_M}$$

$\tau_d = V_d \cdot S_{LN} / I \cdot b$   
 (ec de Jourawsky)  
 $\tau_d = 1,5 \cdot V_d / A$   
 (sección rectangular)

$f_{v,d}$  Resistencia de cálculo a cortante  
 $f_{v,k}$  Resistencia característica a cortante  
 $k_{mod}$  Duración de la carga  
 Clase de servicio  
 $\gamma_M$  Coef parcial de seguridad material

Combinación 1:

$$f_{v,d} = 0,6 \times \frac{3,0}{1,3} = 1,38 \text{ N/mm}^2$$

Combinación 2:

$$f_{v,d} = 0,8 \times \frac{3,0}{1,3} = 1,85 \text{ N/mm}^2$$

$\tau_d$  Tensión de cálculo a cortante  
 $V_d$  Cortante de cálculo  
 $S$  Momento estático (1er orden)  
 $A$  Área

### • Solicitaciones- Cortante

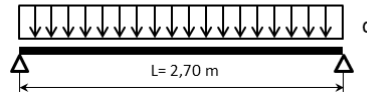
#### 1- Cálculo de cargas y combinaciones de cargas

Cada vigueta soporta

- $qg = 0,57 \text{ kN/m}^2 \times 0,6 \text{ m} = 0,34 \text{ kN/m}$  →  $\gamma F = 1,35$  (acciones permanentes)
- $qq = 1,5 \text{ kN/m}^2 \times 0,6 \text{ m} = 0,94 \text{ kN/m}$  →  $\gamma F = 1,5$  (acciones variables)

combinaciones de cargas

- Combinación 1:  $1,35 \times qg$
- Combinación 2:  $1,35 qg + 1,50 \times qq$

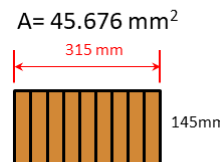


#### 2- Cortante de cálculo

- Combinación 1:  
 $V_d = 1,35 (0,90 \times 2,70/2) = 1,64 \text{ kN} = 1,64 \times 10^3 \text{ N}$
- Combinación 2:  
 $V_d = 1,35 (0,90 \times 2,70/2) + 1,5 (2,0 \times 2,70/2) = 5,69 \text{ kN} = 5,69 \times 10^3 \text{ N}$

#### 3- Tensión de cálculo a cortante

- Combinación 1:  
 $\tau_d = 1,5 \times 1,64 \times 10^3 / (45,676 \times 10^3) = 0,05 \text{ N/mm}^2$
- Combinación 2:  
 $\tau_d = 1,5 \times 5,69 \times 10^3 / (45,676 \times 10^3) = 0,19 \text{ N/mm}^2$



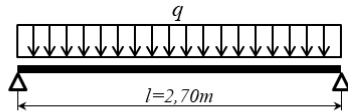
- Combinación 1:  $0,05 \text{ N/mm}^2 < f_{v,d} = 0,6 \times \frac{3,0}{1,3} = 1,38 \text{ N/mm}^2$
- Combinación 2:  $0,19 \text{ N/mm}^2 < f_{v,d} = 0,8 \times \frac{3,0}{1,3} = 1,85 \text{ N/mm}^2$   
**OK**

### 3.3. ELS- deformaciones

- Cargas

- $qg = 0,90 \text{ kN/m}^2 \times 1,0 \text{ m} = 0,90 \text{ kN/m} = 0,90 \text{ N/mm}$
- $qq = 2,0 \text{ kN/m}^2 \times 1,0 \text{ m} = 2,00 \text{ kN/m} = 2,00 \text{ N/mm}$

viga c/carga uniformemente distribuida



$$w_{inst} = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI}$$

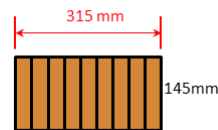
- Flecha debido a acciones permanentes ( $w_g$ )

$$w_g = \frac{5}{384} \frac{0,90 \cdot (2700)^4}{7000 \cdot (8,00 \cdot 10^7)} = 1,11 \text{ mm}$$

$E_{0, \text{medio}} = 7000 \text{ N/mm}^2$   
 Inercia (y):  $I_y = 8,00 \times 10^7 \text{ mm}^4$

- Flecha debido a acciones variables ( $w_q$ )

$$w_{q,1} = \frac{5}{384} \frac{2,00 \cdot (2700)^4}{7000 \cdot (8,00 \cdot 10^7)} = 2,47 \text{ mm}$$



- Limitación de la deformación

1) Integridad: para evitar daños a los elementos no estructurales (cielorrasos, tabiques, aberturas, revestimientos), y garantizar la estanqueidad y el correcto desagüe de las cubiertas. Se consideran las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento:

$$w_{int} \leq \frac{l}{300} = \frac{2700}{300} = 9 \text{ mm}$$

En este caso con una única carga variable se consideran los siguientes valores :

- Flecha debido a la fluencia de la carga permanente:

$$w_g \cdot k_{def} = 1,11 \text{ mm} \times 0,6 = 0,66 \text{ mm} \quad k_{def} : \text{clase servicio 1 y madera maciza}$$

- Flecha debido a la carga variable (dominante)

$$w_q = 2,47 \text{ mm}$$

- Flecha debido a la fluencia de la parte casi permanente de la carga variable

$$k_{def} \cdot \Psi_2 \cdot w_q = 0,6 \times 0,3 \times 2,47 = 0,44 \text{ mm} \quad \Psi_2 : \text{coef de simultaneidad para cargas variables casi permanentes}$$

$$w_{int} = 0,66 + 2,47 + 0,44 = 3,57 \text{ mm} < 9 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

2) Confort: para evitar sensaciones de incomodidad en los usuarios debidas a una percepción de las deformaciones o vibraciones. Se consideran las deformaciones debido solamente a las cargas variables (de corta duración):

$$w_{apa} \leq \frac{l}{350} = \frac{3600}{350} = 10,3mm$$

En este caso con una única carga variable se consideran los siguientes valores :

- Flecha debido a la carga variable (dominante)

$$w_q = 3,57 \text{ mm}$$

$$w_{apa} = 3,57mm < 10,3mm \quad \text{OK}$$

3) Apariencia: para limitar los efectos estéticos visuales de las flechas se limitan las deformaciones debidas a la carga total:

$$w_{apa} \leq \frac{l}{300} = \frac{3600}{300} = 12mm$$

En este caso con una única carga variable se consideran los siguientes valores :

- Flecha debido a la carga permanente:

$$w_g = 2,01 \text{ mm}$$

- Flecha debido a la fluencia de la carga permanente:

$$w_g \cdot k_{def} = 2,01mm \times 0,6 = 1,21 \text{ mm} \quad k_{def} : \text{clase servicio 1 y madera maciza}$$

- Flecha debido a la carga variable (dominante)

$$w_q = 5,57 \text{ mm}$$

- Flecha debido a la fluencia de la parte casi permanente de la carga variable

$$k_{def} \cdot \Psi_2 \cdot w_q = 0,6 \times 0,3 \times 5,57 = 1,00 \text{ mm} \quad \Psi_2 : \text{coef de simultaneidad para cargas variables casi permanentes}$$

$$w_{apa} = 2,01 + 1,21 + 5,57 + 1,00 = 9,79 \text{ mm} < 12mm \quad \text{OK}$$