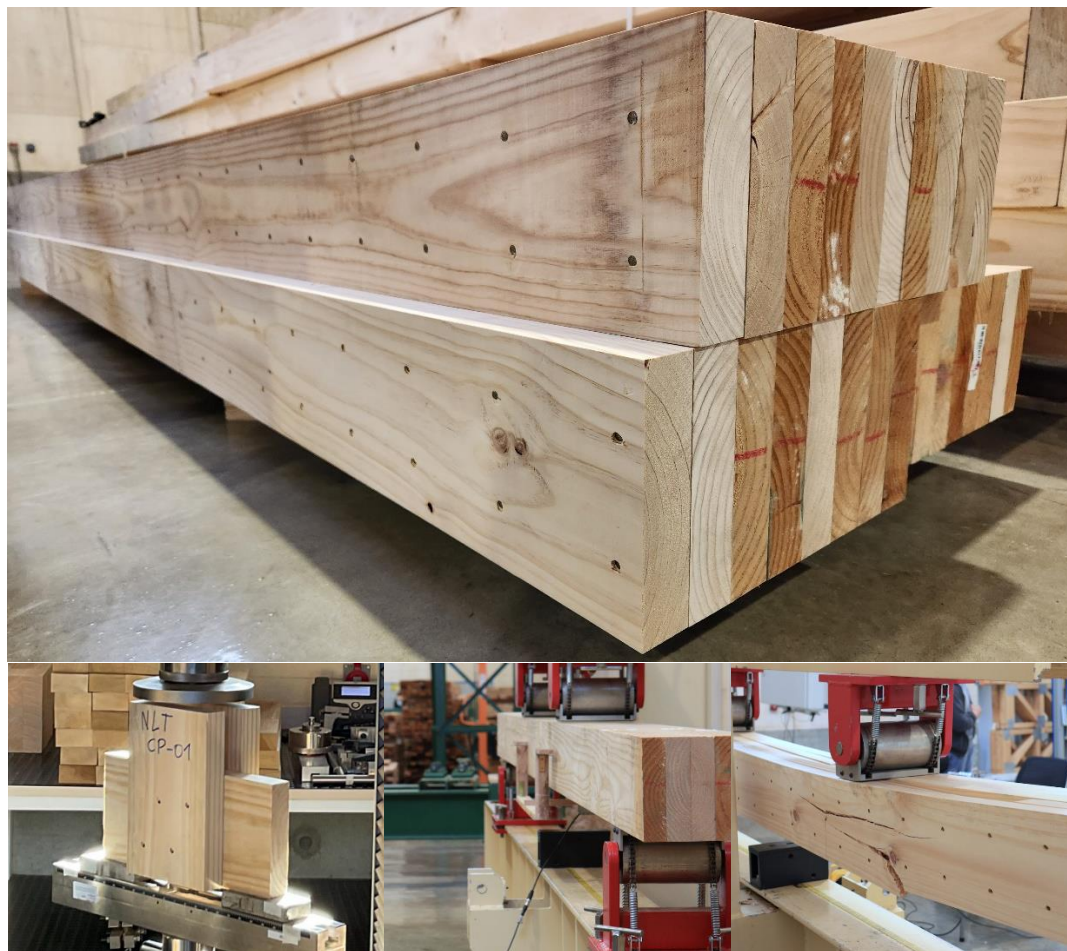


CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA LAMINADA CLAVADA FABRICADA CON MADERA ASERRADA ESTRUCTURAL DE PINO RADIATA



Las fotografías e imágenes incorporadas en tapas o texto de la presente publicación provienen de archivo institucional o fueron obtenidas o elaboradas durante el desarrollo de las actividades del trabajo que origina esta publicación

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA LAMINADA CLAVADA FABRICADA CON MADERA ASERRADA ESTRUCTURAL DE PINO RADIATA

Cristian Reyes Riquelme¹; Luis Vásquez Valenzuela;
Pablo Mardones Díaz y Raúl Campos Pous

**INSTITUTO FORESTAL
2022**

¹ Investigadores Instituto Forestal, Sede Bío Bío. cristian.reyes@infor.cl



INSTITUTO FORESTAL
Sucre 3397, Ñuñoa, Santiago
Chile
F. 56 2 223667115
www.infor.cl

ISBN N° 978 956 318 245 - 3
Registro Propiedad Intelectual N° 2023 A 267

Se autoriza la reproducción parcial de esta publicación siempre y cuando se efectúe la cita correspondiente:

Reyes, Cristian; Vásquez, Luis; Mardones, Pablo y Campos, Raúl (2022). Caracterización Mecánica de la Madera Laminada Clavada Fabricada con Madera Aserrada Estructural de Pino Radiata. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N°253. P. 27.

PRÓLOGO

El Instituto Forestal (INFOR), en el marco del convenio de transferencia suscrito con la Subsecretaría de Agricultura, ha venido desarrollando en los últimos años un programa de I&D+i asociado a productos de madera con valor agregado que apoyan la construcción sustentable.

Como consecuencia del déficit habitacional en Chile, estimada en 650.000 unidades el año 2022, y la escasez de terrenos adecuados para la construcción de viviendas; surge la necesidad de la construcción en altura, ámbito en el cual se presentan oportunidades para los elementos laminados

La madera laminada es un producto estructural que se fabrica bajo condiciones ambientales controladas, que utiliza piezas de madera aserrada estructural de igual sección transversal, de distintos largos, las cuales son adheridas entre ellas con diferentes medios de unión; tales como los adhesivos, tarugos o clavos.

En este estudio se detalla la metodología, los resultados y las principales conclusiones de un programa experimental asociado a las vigas laminadas clavadas fabricadas con madera aserrada estructural de pino radiata, grado visual G1, información que es relevante para los ingenieros calculistas y que favorece la incorporación de este tipo de productos en la construcción de viviendas.

ÍNDICE

PRÓLOGO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO GENERAL.....	1
3. MATERIALES Y MÉTODO.....	1
3.1. Material Experimental.....	1
3.2. Diseño Experimental	3
3.3. Ensayos Mecánicos.....	4
3.3.1. Ensayo de compresión perpendicular	4
3.3.2. Ensayo de tracción paralela	5
3.3.3. Ensayo de flexión	6
3.4. Metodología para Determinar Relaciones Carga - Deformación	7
3.4.1 Mediciones de deslizamiento.....	7
3.4.2 Relaciones carga - deformación	7
3.5. Resistencia Mecánica del Elemento Estructural Madera Laminada Clavada.....	9
4. RESULTADOS	9
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	17
5.1. Ensayos de Uniones Clavadas	17
5.2. Ensayos de Flexión en Laminados Clavados	19
5.3. Capacidad de Servicio.....	20
6. CONCLUSIONES.....	21
7. REFERENCIAS	22
8. ANEXO	23
8.1 Fotografías	23
8.1 Gráficos Representativos de Ensayos.....	24

1. INTRODUCCIÓN

La madera masiva es una categoría de productos que utiliza en su fabricación piezas de madera aserrada estructural que son adheridas entre ellas con la ayuda de adhesivos, clavos o tarugos, proporcionándole una alta resistencia y estabilidad dimensional.

Es un producto con una baja huella de carbono y con alta presencia en la construcción en altura. Los productos más conocidos de esta categoría son la madera laminada (*glued laminated timber*, GLULAM), la madera contralaminada (*cross laminated timber*, CLT), la madera laminada atarugada (*dowel laminated timber*, DLT) y la madera laminada clavada (*nail laminated timber*, NLT).

La madera laminada clavada se fabrica con piezas de madera aserrada estructural dispuestas de canto y unidas mecánicamente con clavos. Los espesores más habituales de la madera son 2, 3 y 4 pulgadas; con anchos entre 4 y 12 pulgadas. Este tipo de producto es popular en losas, tabiques, escaleras y cajas de ascensores. Su fabricación no demanda grandes inversiones en infraestructura ni equipamiento.

La exposición al fuego de la madera laminada clavada es segura por su condición de madera masiva. Expuesta a un siniestro se forma una capa protectora de carbón que hace más lenta la combustión, dando tiempo para evacuación segura de la edificación.

2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades mecánicas de la madera laminada clavada fabricada con madera aserrada estructural de pino radiata, considerando alternativas de fabricación (continua y empalme a tope) y de ensayo (vertical y horizontal), según el código NLT-US *Design and Construction Guide* (NLT-US, 2017) y las normas EN 408 (UNE, 2012), EN 26891 (UNE, 1991) y NCh 3028-2 (INN, 2017b).

3. MATERIALES Y MÉTODO

El estudio se desarrolló en 2 etapas. La primera de ellas consideró la evaluación de la unión clavada con ensayos de compresión perpendicular a la fibra y tracción paralela a la fibra.

La segunda etapa, en tanto, consideró ensayos mecánicos a las vigas laminadas clavadas con laminación vertical y laminación horizontal, considerando en ambos casos laminación continua y laminación con empalme a tope.

3.1. Material Experimental

Se utilizó madera aserrada estructural (MAE) de pino radiata, escuadría 41x85 mm, cepillada, grado estructural visual G1, contenido de humedad del 12% (± 1) y densidad aparente promedio de 475 kg/m³.

Las probetas destinadas a los ensayos de las uniones clavadas consideraron largos de hasta 0,5 m.

En la fabricación de las probetas con uniones clavadas y los elementos laminados se utilizaron clavos de 3" (75 mm, Ø2.8mm). Su hincado se realizó con pistola neumática sin considerar perforación previa al clavado.

Las probetas con uniones clavadas se fabricaron cumpliendo los espaciamientos mínimos indicados por la NCh 1198 (INN, 1991) (Cuadro N°1) y dispuestos de manera que la unión esté centrada con respecto a los esfuerzos del ensayo, solicitando la unión a falla por cizalle simple.

Las Figuras N°1 y N°2 muestran los esquemas de los ensayos a la compresión perpendicular y la tracción paralela, respectivamente. El primer esquema considera una pieza central y 2 piezas laterales dispuestas perpendicularmente a ella. El segundo esquema considera 2 piezas centrales unidas con 2 piezas laterales, todas con orientación paralela a la fibra.

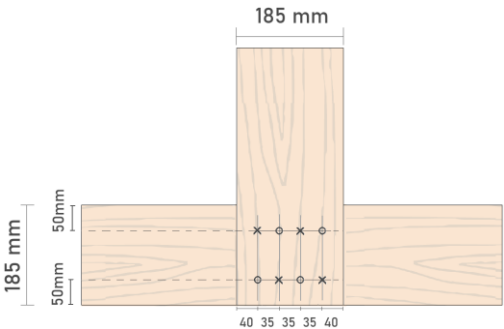


Figura N°1
COMPRESIÓN PERPENDICULAR

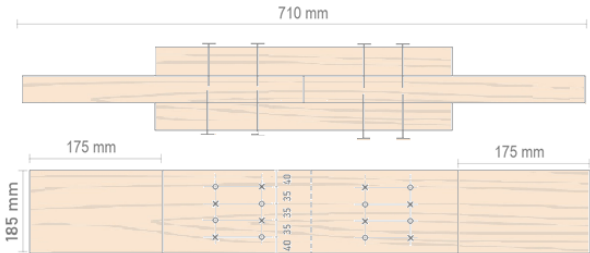


Figura N°2
TRACCIÓN PARALELA

Las probetas de los laminados clavados, continuo y con empalme a tope, consideraron largos de 1 m, 2 m, 3 m y 4 m (Figura N°3). Los elementos laminados clavados consideraron un patrón de clavado en 2 filas, separadas entre ellas a 85 mm, con 50 mm de distancia al borde cargado y 20 mm al borde descargado; cumpliendo con el distanciamiento mínimo indicado por NCh 1198 (Cuadro N°1) y el distanciamiento máximo que señala NLT-US *Design and Construction Guide* (Cuadro N°2).

4m
4m
4m
4m
4m

4m	
1m	3m
2m	2m
3m	1m
4m	

Figura N°3
DISPOSICIÓN DE LÁMINAS EN VIGA LAMINADA CLAVADA, CONTINUA Y CON EMPALMES

Cuadro N°1
ESPACIAMIENTOS MÍNIMOS DE CLAVADO DE ACUERDO AL DIÁMETRO D

Separación mínima		Clavado sin perforación guía			
		$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$		$30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	
		$D \leq 4,2$	$D > 4,2$	$D \leq 4,2$	$D > 4,2$
Entre clavos	Paralelo // (Sp)	10D	12D	10D	12D
	Perpendicular $\perp$ (Sn)	5D	5D	5D	5D
Desde el borde cargado	Paralelo // (Sbcp)	15D	15D	15D	15D
	Perpendicular $\perp$ (Sbcn)	5D	7D	7D	10D
Desde el borde descargado	Paralelo // (Sbdp)	7D	10D	7D	10D
	Perpendicular $\perp$ (Sbdn)	5D	5D	5D	5D

Cuadro N°2
CLAVADO MÍNIMO PARA LAMINACIONES SEGÚN NLT – US DESIGN AND CONSTRUCTION GUIDE

Tipo de NLT	Altura del NLT	Patrón de clavado	
		3" $\varnothing$ 3,75mm	3" $\varnothing$ 3,25mm
Laminación continua	Menos de 152,4 mm	Una fila @178 mm	Una fila @127 mm
	Más de 152,4 mm	Dos filas @356 mm	Dos filas @254 mm
Laminación con empalme	Menos de 152,4 mm	Una fila @178 mm	Una fila @127 mm
	Más de 152,4 mm	Dos filas @254 mm	Dos filas @254 mm

Se utilizó una separación entre clavos de 120 mm, distancia que facilita el proceso de fabricación del laminado. La Figura N°4 ilustra el patrón de clavado utilizado, que considera un desfase entre las láminas para evitar el contacto entre clavos.

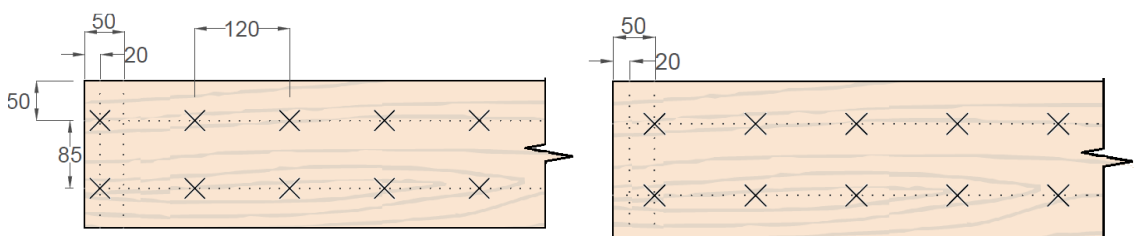


Figura N°4
CLAVADO EN LÁMINAS CONSECUTIVAS

3.2. Diseño Experimental

El Cuadro N°3 señala el diseño experimental de la Etapa 1, que permite determinar la razón fuerza/deslizamiento en uniones clavadas sometidas a falla por cizalle simple.

Cuadro N°3
RAZON FUERZA/DEFORMACIÓN EN UNIONES CLAVADAS

Variable	Cantidad
Grado estructural de la madera	1 (G1)
Escuadría	1 (41x185mm)
Ensayos	2 (Compresión perpendicular, Tracción paralela)
Repeticiones	30
Total de ensayos	60

El Cuadro N°4 señala el diseño experimental de la Etapa 2, que permite determinar las capacidades de resistencia y rigidez en flexión de los elementos laminados clavados.

Cuadro N°4
RESISTENCIA Y RIGIDEZ EN FLEXIÓN

Variable	Cantidad
Grado estructural de la madera	1 (G1)
Escuadría	1 (41x185mm)
Tipo de elemento	4 (Laminación vertical con y sin empalme a tope; Laminación horizontal con y sin empalme a tope)
Ensayos	1 (Flexión)
Repeticiones	5
Total de ensayos	20

Adicionalmente, se ensayaron en flexión, con el esquema de carga puntual, 2 elementos laminados clavados de 8 láminas, una continua y otra con empalme a tope.

3.3. Ensayos Mecánicos

Las mediciones y ensayos mecánicos del material experimental fueron ejecutados en el Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR), laboratorio con acreditación NCh-ISO 17025, ubicado en la sede Biobío de INFOR, Concepción.

3.3.1. Ensayo de compresión perpendicular

El ensayo de compresión perpendicular (Figura N°5) fue ejecutado según indicaciones de la norma EN 26891 (UNE, 1991) y permite determinar capacidades y el deslizamiento en uniones clavadas fabricadas con madera estructural. Se utilizó un esquema de carga de compresión perpendicular a la fibra, con un plano de corte en cada cara de la probeta, de manera de inducir una falla por cizalle simple en la unión clavada.

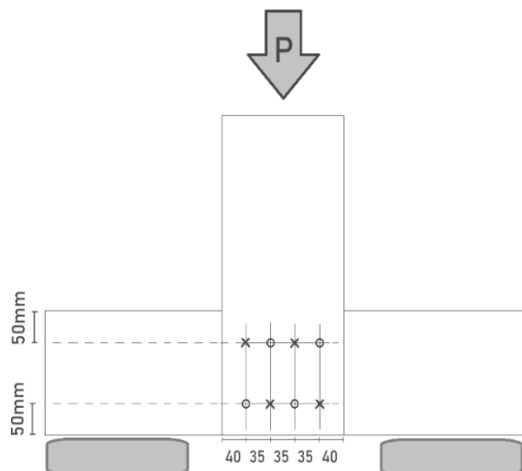


Figura N° 5
ESQUEMA DE ENSAYO COMPRESIÓN PERPENDICULAR E IMPLEMENTACIÓN

3.3.2. Ensayo de tracción paralela

El ensayo de tracción paralela (Figura N°6) fue ejecutado según indicaciones de la norma EN 26891 (UNE, 1991) y permite determinar capacidades y el deslizamiento en uniones clavadas fabricadas con madera estructural. Se utilizó un esquema de carga en tracción paralela a la fibra, donde las piezas centrales transmiten la carga a los planos de corte ubicados entre las piezas centrales y laterales.

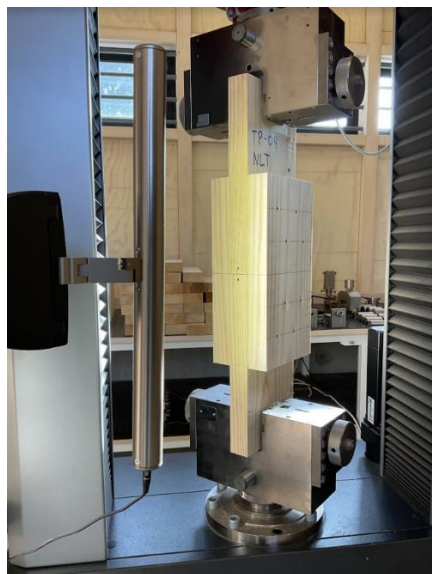
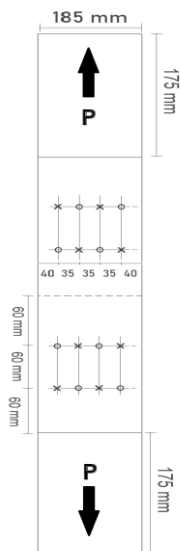


Figura N°6
ESQUEMA DE ENSAYO DE TRACCIÓN PARALELA E IMPLEMENTACIÓN

Considerando que en la ejecución de este ensayo se trabajó con 2 uniones clavadas, es necesario corregir los resultados asociados al promedio, desviación estándar y valor característico. La corrección se aplicó con el procedimiento descrito por Jiménez, G. (1990). Capacidades admisibles de medios de unión mecánicos elaborados de madera microlaminada. (Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile).

3.3.3. Ensayo de flexión

El ensayo de flexión de cuatro puntos fue ejecutado según indicaciones de la norma EN 408 (UNE, 2012), que permite determinar los parámetros de rigidez y carga de rotura en elementos tipo viga dispuestos de cara o canto.

Se registró la rigidez global midiendo la deformación ocurrida entre los puntos de apoyo con un sensor laser dispuesto en la parte central inferior del laminado. La rigidez local se registró midiendo las deformaciones ocurridas entre los puntos de carga con respecto al eje neutro de la viga.

Adicional a los ensayos señalados en el párrafo previo, se realizó un ensayo de carga puntual bajo un esquema de flexión de 3 puntos, para determinar el desplazamiento entre laminas.

Las Figuras N°7 a N°12 registran los distintos esquemas del ensayo y su implementación en el laboratorio.

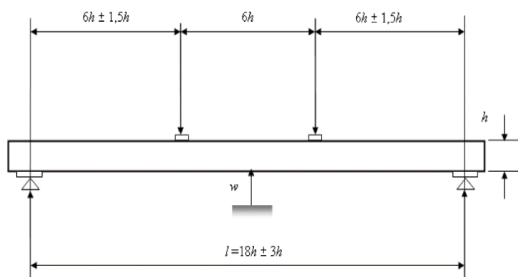


Figura N°7
ESQUEMA DEL ENSAYO DE FLEXIÓN



Figura N°8
IMPLEMENTACIÓN ENSAYO DE FLEXIÓN

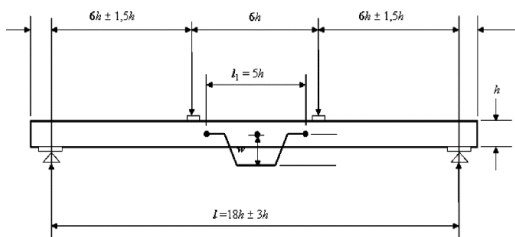


Figura N°9
ESQUEMA DE MEDICIÓN RIGIDEZ LOCAL



Figura N°10
IMPLEMENTACIÓN MEDICIÓN RIGIDEZ LOCAL

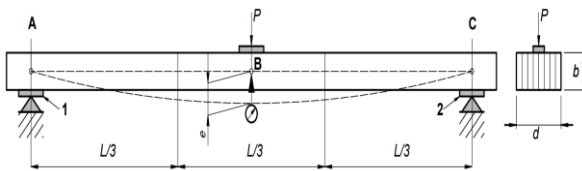


Figura N°11
ESQUEMA DE FLEXIÓN DE CARGA PUNTUAL

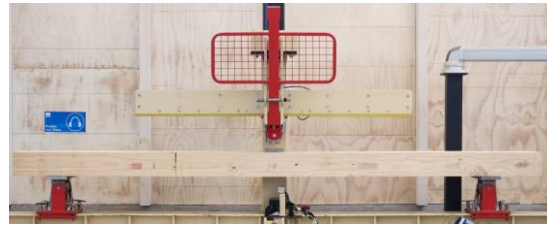


Figura N°12
IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL

3.4. Metodología para Determinar Relaciones Carga – Deformación

3.4.1 Mediciones de deslizamiento (Uniones)

Se registraron mediciones de deslizamiento en los puntos v_{01} a v_{28} (Figura N°13), que están asociados a los intervalos del ciclo de carga indicado por la norma EN 26891 (Figura N°14), y que consideran como referencia la carga máxima esperada para un grupo de probetas con un mismo tipo de unión.

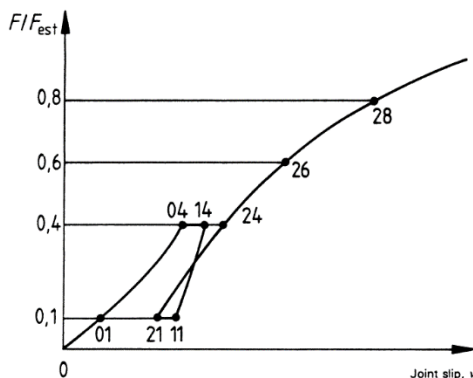


Figura N°13
PUNTOS DE INTERÉS MEDIDOS DURANTE EL CICLO DE CARGA

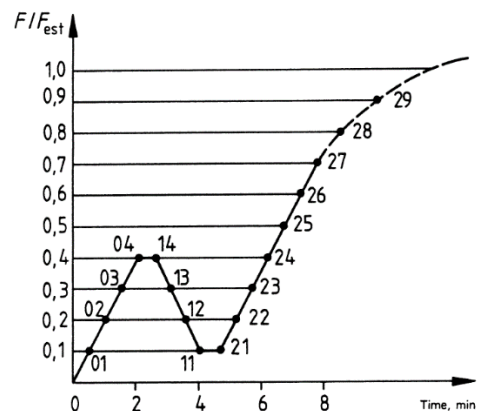


Figura N°14
CICLO DE CARGA DE LOS ENSAYOS DE UNIONES CLAVADAS

Luego, v_{01} , v_{21} , v_{11} corresponden a un estado de carga del 10% de la carga estimada. Los puntos v_{04} , v_{14} y v_{24} corresponden a un 40% de la carga esperada. Finalmente, los puntos v_{26} y v_{28} corresponden al 60% y 80% de la carga máxima esperada, respectivamente.

3.4.2 Relaciones carga - deformación

A partir de los puntos registrados se obtiene una completa caracterización de la unión clavada, que considera la carga máxima alcanzada por el medio de unión, el deslizamiento inicial, el deslizamiento inicial modificado, el asentamiento de la unión, el deslizamiento elástico, el

módulo inicial de deslizamiento, el módulo de deslizamiento, y los deslizamientos al 60% y 80% de la carga máxima. Las expresiones utilizadas en sus determinaciones son las que se indican:

<i>Deslizamiento inicial</i>	v_{04}
<i>Deslizamiento inicial modificado</i>	$v_{i,mod} = \frac{4}{3}(v_{04} - v_{01})$
<i>Asentamiento de la unión</i>	$v_s = v_i - v_{i,mod}$
<i>Deslizamiento elástico</i>	$v_e = \frac{2}{3}(v_{14} + v_{24} - v_{11} - v_{21})$
<i>Módulo inicial de deslizamiento</i>	$k_i = 0,4F_{est}/v_i$
<i>Módulo de deslizamiento</i>	$k_s = 0,4F_{est}/v_{i,mod}$
<i>Deslizamiento 60% modificado</i>	$v_{0,6,mod} = v_{0,6} - v_{24} + v_{i,mod}$
<i>Deslizamiento 80% modificado</i>	$v_{0,8,mod} = v_{0,8} - v_{24} + v_{i,mod}$

De acuerdo al Eurocódigo-5, el módulo de deslizamiento en uniones clavadas sin pre taladrado se define teóricamente con la formula siguiente:

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} * d^{0,8}}{30}$$

Donde:

ρ_m	:	Densidad media de la madera (kg/m ³), según EN 338 (2010)
d	:	Diámetro del clavo (mm)

Según NCh 1198, el módulo de corrimiento en clavos solicitados al cizalle simple sin pre taladrado se determina con la formula siguiente:

$$C_{CM} = 5 * \frac{P_{ad}}{dc}$$

Donde:

C_{CM}	:	Módulo de corrimiento, según NCh1189 (N/mm)
P_{ad}	:	Carga admisible del clavo (N)
dc	:	Diámetro del clavo (mm)

El parámetro adicional que denota el comportamiento de la unión de acuerdo a su relación de carga-deformación es la pendiente asociada al primer y segundo tramos de carga (m_1 y m_2).

3.5. Resistencia Mecánica del Elemento Estructural Madera Laminada Clavada (Vigas)

El diseño en flexión de los laminados clavados bajo las directrices de NLT-US *Design and construction guide* asegura que la capacidad bajo esfuerzos de flexión (f_b) es menor que la capacidad otorgada al elemento laminado clavado ($F_{b,NLT}$). Según las indicaciones, la resistencia en flexión del laminado clavado se calcula asumiendo un comportamiento lineal, con las tensiones máximas ocurriendo en los extremos del elemento. Su capacidad en flexión se calcula con la capacidad individual de las láminas (F_{b1}) de acuerdo al *National Design Specification del American Wood Council* (NDS, 2018) y se modifica con factores que consideran el tipo de elemento (K_{layup}) y el tipo de sección ($K_{section}$).

Tensión en flexión en laminados clavados

$$f_{b,NLT} = \frac{6M}{b_{panel}d^2}$$

Capacidad en flexión de laminados clavados

$$F_{b,NLT} = F_b K_{layup} K_{section.b}$$

Deflexión laminados clavados

$$EI_{NLT} = E' K_{layup} K_{section.b} \frac{b_{panel}d^3}{12}$$

Dónde,

$K_{section}$: 1 para elementos laminados con una única altura de lámina
 $K_{layup.b}$: 1 para elementos continuos
 0,67 (0,69 *) para elementos con empalme
 d : altura del laminado
 E' : Módulo de elasticidad de la madera

*Utilizado para el cálculo de deflexión.

4. RESULTADOS

Los Cuadros N°5 al N°10 registran los resultados y la estadística descriptiva de los ensayos mecánicos ejecutados a uniones clavadas sometidas a cargas de compresión perpendicular y tracción paralela.

Cuadro N° 5
PUNTOS DE DESLIZAMIENTO MEDIDOS DURANTE EL ENSAYO DE COMPRESIÓN PERPENDICULAR

Probeta N°	Deformación en cada estado de carga [mm]							
	V01	V04	V14	V11	V21	V24	V06	V08
1	0,25	1,11	1,22	0,74	0,72	1,23	3,68	8,35
2	0,24	1,01	1,07	0,66	0,65	1,09	2,51	7,02
3	0,23	1,07	1,15	0,69	0,68	1,16	2,90	7,71
4	0,23	0,97	1,04	0,60	0,59	1,05	2,53	6,75
5	0,26	1,13	1,24	0,76	0,74	1,25	4,34	8,30
6	0,25	1,29	1,39	0,86	0,85	1,40	4,68	8,85
7	0,22	1,13	1,24	0,77	0,76	1,26	3,74	7,18
8	0,27	1,75	1,89	1,37	1,35	1,91	6,26	10,92

Cuadro N° 5
PUNTOS DE DESLIZAMIENTO MEDIDOS DURANTE EL ENSAYO DE COMPRESIÓN
PERPENDICULAR

Probeta N°	Deformación en cada estado de carga [mm]							
	V ₀₁	V ₀₄	V ₁₄	V ₁₁	V ₂₁	V ₂₄	V ₀₆	V ₀₈
9	0,25	1,39	1,49	1,00	0,98	1,52	5,42	10,06
10	0,23	1,61	1,82	1,19	1,17	1,85	6,83	11,36
11	0,23	1,62	1,84	1,24	1,22	1,87	6,87	12,13
12	0,33	1,28	1,40	0,93	0,91	1,42	3,84	8,11
13	0,27	1,39	1,51	1,01	0,99	1,53	5,38	8,43
14	0,26	1,31	1,42	0,93	0,92	1,44	4,93	9,05
15	0,27	1,47	1,62	1,07	1,05	1,65	5,35	9,92
16	0,23	1,15	1,26	0,83	0,81	1,27	2,74	6,73
17	0,22	1,23	1,36	0,86	0,84	1,38	4,74	8,62
18	0,21	0,87	0,95	0,57	0,56	0,96	2,75	6,44
19	0,31	1,47	1,63	1,08	1,06	1,66	4,51	9,57
20	0,28	1,23	1,33	0,83	0,82	1,34	4,05	8,26
21	0,22	1,51	1,67	1,19	1,16	1,69	5,38	10,24
22	0,21	1,16	1,28	0,82	0,80	1,30	3,71	7,66
23	0,37	1,38	1,48	0,97	0,95	1,50	4,72	9,10
24	0,27	1,43	1,55	1,04	1,02	1,58	5,42	9,30
25	0,38	1,88	2,08	1,49	1,47	2,12	6,19	10,84
26	0,26	2,10	2,42	1,78	1,75	2,47	7,57	13,11
27	0,37	1,23	1,33	0,89	0,88	1,35	4,12	9,16
28	0,22	1,48	1,67	1,18	1,16	1,70	5,47	10,28
29	0,47	2,20	2,55	1,99	1,97	2,59	7,85	15,50
30	0,26	1,33	1,47	0,96	0,94	1,50	5,20	8,94

Estadístico	Deformación en cada estado de carga							
	V ₀₁	V ₀₄	V ₁₄	V ₁₁	V ₂₁	V ₂₄	V ₀₆	V ₀₈
Promedio	0,27	1,37	1,51	1,01	0,99	1,53	4,79	9,26
Valor mínimo	0,21	0,87	0,95	0,57	0,56	0,96	2,51	6,44
Valor máximo	0,47	2,20	2,55	1,99	1,97	2,59	7,85	15,50
Rango	0,27	1,32	1,60	1,42	1,41	1,64	5,34	9,06
Des. estándar	0,06	0,31	0,37	0,32	0,32	0,38	1,44	1,99
C. de V. (%)	22	23	25	32	32	25	30	22
Tamaño muestra	30	30	30	30	30	30	30	30
5° Percentil	0,21	0,93	1,00	0,59	0,58	1,01	2,52	6,59

Cuadro N° 6
PARÁMETROS DE DESLIZAMIENTO OBTENIDOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN
PERPENDICULAR

Probeta N°	Deformación en cada estado de carga						
	V_i [mm]	$V_{i,mod}$ [mm]	V_e [mm]	k_i [N/mm]	k_s [N/mm]	$V_{0,6mod}$ [mm]	$V_{0,8mod}$ [mm]
1	1,11	1,14	0,66	3.965	3.844	3,68	8,35
2	1,01	1,03	0,57	4.346	4.275	2,51	7,02
3	1,07	1,11	0,63	4.123	3.961	2,90	7,71
4	0,97	0,99	0,61	4.534	4.458	2,53	6,75
5	1,13	1,16	0,66	3.893	3.792	4,34	8,30
6	1,29	1,38	0,72	3.416	3.189	4,68	8,85
7	1,13	1,20	0,65	3.909	3.663	3,74	7,18
8	1,75	1,97	0,72	2.517	2.236	6,26	10,92
9	1,39	1,52	0,68	3.172	2.904	5,42	10,06
10	1,61	1,84	0,88	2.725	2.391	6,83	11,36
11	1,62	1,85	0,84	2.722	2.383	6,87	12,13
12	1,28	1,27	0,65	3.439	3.477	3,84	8,11
13	1,39	1,50	0,70	3.170	2.941	5,38	8,43
14	1,31	1,39	0,68	3.371	3.158	4,93	9,05
15	1,47	1,59	0,76	3.002	2.760	5,35	9,92
16	1,15	1,23	0,59	3.822	3.575	2,74	6,73
17	1,23	1,35	0,70	3.564	3.256	4,74	8,62
18	0,87	0,89	0,51	5.034	4.940	2,75	6,44
19	1,47	1,55	0,77	2.991	2.831	4,51	9,57
20	1,23	1,27	0,68	3.585	3.467	4,05	8,26
21	1,51	1,72	0,67	2.909	2.556	5,38	10,24
22	1,16	1,27	0,64	3.788	3.464	3,71	7,66
23	1,38	1,34	0,70	3.197	3.283	4,72	9,10
24	1,43	1,56	0,72	3.067	2.829	5,42	9,30
25	1,88	2,00	0,83	2.343	2.197	6,19	10,84
26	2,10	2,45	0,91	2.097	1.795	7,57	13,11
27	1,23	1,14	0,61	3.586	3.844	4,12	9,16
28	1,48	1,68	0,69	2.966	2.617	5,47	10,28
29	2,20	2,30	0,78	2.003	1.914	7,85	15,50
30	1,33	1,43	0,72	3.315	3.087	5,20	8,94

Estadístico	Deformación en cada estado de carga						
	V_i [mm]	$V_{i,mod}$ [mm]	v_e [mm]	k_i [N/mm]	k_s [N/mm]	$V_{0,6mod}$ [mm]	$V_{0,8mod}$ [mm]
Promedio	1,37	1,47	0,70	3.352	3.170	4,73	9,20
Valor mínimo	0,87	0,89	0,51	2.003	1.795	2,45	6,37
Valor máximo	2,20	2,45	0,91	5.034	4.940	7,56	15,20
Rango	1,32	1,56	0,40	3.030	3.145	5,10	8,83
Des. estándar	0,31	0,38	0,09	696	751	1,44	1,98
C. de V. (%)	23	26	13	21	24	30	22
Tamaño muestra	30	30	30	30	30	30	30
5° Percentil	0,96	0,96	0,56	2.055	1.860	2,50	6,57

Cuadro N° 7
PARÁMETROS ADICIONALES MEDIDOS EN ENSAYO DE COMPRESIÓN PERPENDICULAR

Probeta N°	Pendiente m_1 [N/mm]	Ajuste R^2	Pendiente m_2 [N/mm]	Ajuste R^2	F_{Max} Unitario [N]
1	4.065	0,99	6.434	1,00	1.322
2	4.451	1,00	7.580	1,00	1.489
3	4.051	0,99	6.775	1,00	1.378
4	4.605	1,00	7.240	1,00	1.456
5	4.031	0,99	6.403	1,00	1.467
6	3.290	0,99	5.923	1,00	1.290
7	4.581	0,99	6.506	1,00	1.391
8	3.010	0,99	5.757	1,00	1.178
9	3.056	1,00	6.124	1,00	1.163
10	3.457	0,99	4.784	1,00	1.154
11	3.005	0,99	5.009	1,00	1.118
12	3.662	0,99	6.503	1,00	1.295
13	2.948	0,99	6.068	1,00	1.401
14	4.070	0,99	6.151	1,00	1.289
15	3.627	0,99	5.489	1,00	1.263
16	4.481	0,99	7.181	1,00	1.457
17	4.348	0,99	6.006	1,00	1.267
18	5.130	0,99	8.294	1,00	1.512
19	3.738	0,99	5.476	1,00	1.284
20	3.734	0,99	6.156	1,00	1.436
21	4.449	0,99	6.055	0,99	1.107
22	3.587	0,99	6.577	1,00	1.381
23	3.479	0,99	6.000	1,00	1.374
24	3.847	0,99	5.847	1,00	1.352
25	3.166	0,99	5.022	1,00	1.123
26	2.477	0,99	4.633	1,00	1.105
27	4.807	0,99	6.960	1,00	1.183
28	3.729	0,99	6.034	0,99	1.131
29	2.798	0,99	5.233	0,99	1.110
30	3.960	0,99	5.867	1,00	1.218

Estadístico	Pendiente m_1 [N/mm]	Pendiente m_2 [N/mm]	F_{MAX} Unitario [N]
Promedio	3.788	6.136	1.290
Valor mínimo	2.477	4.633	1.105
Valor máximo	5.130	8.294	1.512
Rango	2.653	3.661	407
Des. estándar	649	819	131
C. de V. (%)	17	13	10
Tamaño muestra	30	30	30
5° Percentil	2.653	4.056	1.106

Cuadro N° 8
PUNTOS DE DESLIZAMIENTO MEDIDOS DURANTE EL ENSAYO DE TRACCIÓN PARALELA

Probeta N°	Deformación en cada estado de carga [mm]							
	V ₀₁	V ₀₄	V ₁₄	V ₁₁	V ₂₁	V ₂₄	V ₀₆	V ₀₈
1	0,65	2,45	2,63	2,09	2,05	2,65	5,15	12,14
2	0,42	2,12	2,30	1,84	1,82	2,35	6,15	13,25
3	0,83	2,53	2,67	2,14	2,12	2,70	5,65	13,44
4	0,64	1,59	1,64	1,18	1,17	1,63	3,55	8,99
5	0,76	2,30	2,36	1,92	1,90	2,39	4,94	11,38
6	0,28	1,86	1,96	1,38	1,36	1,94	3,42	8,56
7	0,51	2,25	2,39	1,89	1,86	2,43	4,99	12,05
8	0,19	1,77	1,89	1,27	1,25	1,87	3,97	9,62
9	0,63	2,28	2,43	1,91	1,88	2,47	5,02	11,61
10	0,49	1,99	2,14	1,68	1,65	2,17	4,47	9,97
11	0,79	2,17	2,30	1,89	1,87	2,33	4,63	10,44
12	0,37	1,90	1,97	1,53	1,51	2,02	4,90	11,49
13	0,35	1,93	1,97	1,53	1,52	2,02	5,03	11,53
14	0,37	2,06	2,20	1,57	1,53	2,19	4,55	12,50
15	0,43	2,09	2,21	1,61	1,59	2,19	4,14	10,20
16	0,24	1,66	1,83	1,26	1,24	1,81	3,61	9,23
17	0,35	1,70	1,80	1,28	1,26	1,78	3,10	7,80
18	0,40	2,13	2,23	1,80	1,78	2,28	5,47	11,91
19	0,42	2,13	2,17	1,70	1,68	2,22	5,44	13,12
20	0,53	2,14	2,29	1,86	1,83	2,33	5,18	11,46
21	0,65	2,42	2,62	2,13	2,10	2,66	5,81	14,59
22	0,37	1,77	1,86	1,36	1,32	1,84	3,36	8,36
23	0,47	2,44	2,63	2,04	2,00	2,62	5,52	12,96
24	1,15	2,92	3,07	2,58	2,55	3,07	5,28	10,30
25	0,94	2,61	2,79	2,44	2,42	2,84	5,64	11,93
26	0,47	2,17	2,29	1,80	1,77	2,33	5,88	16,05
27	0,71	2,24	2,32	1,85	1,81	2,36	4,38	10,40
28	0,68	2,91	2,98	2,36	2,34	3,03	7,26	14,87
29	0,55	2,45	2,57	2,07	2,04	2,61	5,90	15,21
30	0,31	1,85	2,00	1,59	1,57	2,04	5,01	10,54

Estadístico	Deformación en cada estado de carga							
	V ₀₁	V ₀₄	V ₁₄	V ₁₁	V ₂₁	V ₂₄	V ₀₆	V ₀₈
Promedio	0,53	2,16	2,28	1,79	1,76	2,31	4,91	11,53
Valor mínimo	0,19	1,59	1,64	1,18	1,17	1,63	3,10	7,80
Valor máximo	1,15	2,92	3,07	2,58	2,55	3,07	7,26	16,05
Rango	0,95	1,33	1,43	1,40	1,38	1,43	4,16	8,24
Des. estándar	0,22	0,34	0,35	0,36	0,36	0,36	0,94	2,07
C. de V. (%)	41	16	15	20	20	16	19	18
Tamaño muestra	30	30	30	30	30	30	30	30
5° Percentil	0,22	1,63	1,73	1,23	1,21	1,71	3,24	8,11

Cuadro N° 9
PARÁMETROS DE DESLIZAMIENTO OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARALELA

Probeta N°	Deformación en cada estado de carga						
	V_i [mm]	$V_{i\text{mod}}$ [mm]	V_e [mm]	k_i [N/mm]	k_s [N/mm]	$V_{0,6\text{mod}}$ [mm]	$V_{0,8\text{mod}}$ [mm]
1	2,45	2,40	0,76	1.793	1.831	5,15	12,14
2	2,12	2,27	0,65	2.079	1.941	6,15	13,25
3	2,53	2,27	0,74	1.738	1.935	5,65	13,44
4	1,59	1,27	0,61	2.763	3.459	3,55	8,99
5	2,30	2,06	0,62	1.912	2.138	4,94	11,38
6	1,86	2,11	0,77	2.368	2.088	3,42	8,56
7	2,25	2,32	0,71	1.958	1.900	4,99	12,05
8	1,77	2,10	0,83	2.486	2.093	3,97	9,62
9	2,28	2,20	0,74	1.931	2.003	5,02	11,61
10	1,99	2,00	0,65	2.207	2.198	4,47	9,97
11	2,17	1,85	0,58	2.025	2.384	4,63	10,44
12	1,90	2,04	0,63	2.314	2.157	4,90	11,49
13	1,93	2,11	0,63	2.131	1.942	5,03	11,53
14	2,06	2,27	0,86	2.108	1.986	4,55	12,50
15	2,09	2,22	0,80	2.592	2.456	4,14	10,20
16	1,66	1,89	0,76	2.062	1.901	3,61	9,23
17	1,70	1,79	0,70	2.068	1.931	3,10	7,80
18	2,13	2,31	0,62	2.059	2.059	5,47	11,91
19	2,13	2,28	0,67	1.820	1.869	5,44	13,12
20	2,14	2,14	0,61	2.486	2.352	5,18	11,46
21	2,42	2,35	0,70	1.802	1.674	5,81	14,59
22	1,77	1,87	0,68	1.507	1.859	3,36	8,36
23	2,44	2,63	0,80	1.685	1.978	5,52	12,96
24	2,92	2,37	0,67	2.025	1.935	5,28	10,30
25	2,61	2,22	0,51	1.961	2.152	5,64	11,93
26	2,17	2,27	0,70	1.511	1.480	5,88	16,05
27	2,24	2,04	0,67	1.796	1.736	4,38	10,40
28	2,91	2,97	0,88	2.383	2.153	7,26	14,87
29	2,45	2,53	0,71	2.274	2.087	5,90	15,21
30	1,85	2,04	0,59	2.030	2.165	5,01	10,54

Estadístico	V_i [mm]	$V_{i\text{mod}}$ [mm]	V_e [mm]	k_i [kN/mm]	k_s [kN/mm]	$V_{0,6\text{mod}}$ [mm]	$V_{0,8\text{mod}}$ [mm]
Promedio	2,16	2,17	0,70	2.062	2.061	4,91	11,53
Valor mínimo	1,59	1,27	0,51	1.506	1.480	3,10	7,80
Valor máximo	2,92	2,97	0,88	2.763	3.459	7,26	16,05
Rango	1,33	1,70	0,36	1.257	1.980	4,16	8,24
Des. estándar	0,34	0,30	0,09	303	334	0,94	2,07
C. de V. (%)	16	14	12	15	16	19	18
Tamaño muestra	30	30	30	30	30	30	30
5° Percentil	1,66	1,58	0,56	1.509	1.587	3,16	8,13

Cuadro N° 10
PARÁMETROS ADICIONALES MEDIDOS EN ENSAYO DE TRACCIÓN PARALELA

Probeta N°	Pendiente m_1 [N/mm]	Ajuste R^2	Pendiente m_2 [N/mm]	Ajuste R^2	F_{Max} Unitario [N]
1	1.692	1,00	5.237	0,99	1.360
2	1.793	0,99	5.719	0,99	1.209
3	1.810	1,00	4.383	0,99	1.353
4	3.231	1,00	4.906	0,99	1.290
5	2.082	1,00	5.107	0,99	1.277
6	2.048	1,00	3.965	0,99	1.690
7	1.761	1,00	4.444	0,99	1.255
8	1.993	1,00	3.688	0,99	1.341
9	1.841	1,00	3.641	0,99	1.450
10	2.005	1,00	8.488	0,99	1.346
11	2.209	1,00	5.668	0,99	1.524
12	2.030	1,00	4.989	1,00	1.375
13	1.522	0,99	8.463	0,99	821
14	1.866	1,00	3.327	0,99	1.235
15	1.883	1,00	3.907	0,99	1.373
16	2.165	1,00	3.955	0,99	1.563
17	2.392	1,00	5.401	0,99	1.204
18	2.041	0,99	3.909	0,99	1.443
19	2.090	0,99	3.741	0,99	1.279
20	1.731	0,99	4.517	0,99	1.515
21	1.712	0,99	3.678	0,99	1.119
22	2.304	1,00	4.405	1,00	1.410
23	1.688	1,00	3.711	0,99	1.296
24	1.701	0,99	4.112	0,99	1.434
25	1.809	1,00	10.735	0,99	1.320
26	2.070	0,99	4.486	0,99	1.174
27	1.850	0,99	17.878	0,99	1.204
28	1.485	1,00	4.256	0,99	1.259
29	1.600	0,99	10.911	0,99	1.134
30	1.924	0,99	11.606	0,99	1.453

Estadístico	Pendiente m_1 [N/mm]	Pendiente m_2 [N/mm]	F_{MAX} Unitario [N]
Promedio	1.944	5.774	1.434
Valor mínimo	1.485	3.327	821
Valor máximo	3.230	17.878	1.690
Rango	1.745	14.551	869
Des. estándar	328	3.234	367
C. de V. (%)	17	56	16
Tamaño muestra	30	30	30
5° Percentil	1.505	2.634	1.067

Los Cuadros N°11 y N°12 registran los resultados y la estadística descriptiva de los ensayos mecánicos en flexión de las vigas laminadas clavadas con laminaciones vertical y horizontal, continua y con empalme.

Cuadro N° 11
ENSAYO DE FLEXIÓN EN VIGA LAMINADA CLAVADA, LAMINACIÓN VERTICAL

Viga	Laminación vertical							
	Laminación continua				Laminación con empalme			
	EI [kN-m ²]	EI _{local} [kN-m ²]	MF [kN-m]	F _{max} [kN]	EI [kN-m ²]	EI _{local} [kN-m ²]	MF [kN-m]	F _{max} [kN]
1	1.064	1.225	51,0	93,3	826	517	41,5	74,8
2	943	1.559	51,0	93,4	760	651	52,4	94,4
3	989	1.140	50,1	91,7	865	626	37,9	68,3
4	925	1.261	47,7	87,3	874	770	28,3	51,1
5	1.205	1.592	48,5	88,8	762	618	42,3	76,2
Estadística	EI [kN-m²]	EI_{local} [kN-m²]	MF [kN-m]	F_{max} [kN]	EI [kN-m²]	EI_{local} [kN-m²]	MF [kN-m]	F_{max} [kN]
Promedio	1.025	1355	49,6	90,9	818	818	39,2	70,6
Valor mínimo	925	1140	47,7	87,3	761	761	28,3	51,1
Valor máximo	1.205	1592	51,0	93,4	875	875	52,4	94,4
Rango	280	453	3,3	6,1	114	114	24,1	43,4
Des. estándar	114	206	1,5	2,8	54	54,6	8,7	15,6
C. de V. (%)	11	15	3	3	7	7	22	22
Tamaño muestra	5	5	5	5	5	5	5	5

EI: Rigidez; MF: Momento flector; F_{max}:Carga maxima alcanzada

Cuadro N° 12
ENSAYO DE FLEXIÓN EN VIGA LAMINADA CLAVADA, LAMINACIÓN HORIZONTAL

Viga	Laminación horizontal			
	Laminación continua		Laminación con empalme	
	EI [kN-m ²]	EI _{local} [kN-m ²]	EI [kN-m ²]	EI _{local} [kN-m ²]
1	283	306	342	312
2	312	306	323	303
3	351	249	344	326
4	401	404	344	296
5	273	-	355	295
Estadística	EI [kN-m²]	EI_{local} [kN-m²]	EI [kN-m²]	EI_{local} [kN-m²]
Promedio	324	316	333	306
Valor mínimo	273	249	288	295
Valor máximo	401	404	355	326
Rango	128	155	68	31
Des. estándar	53	64,2	12	12,8
C. de V. (%)	16	20	3	4
Tamaño muestra	5	4	5	5

El Cuadro N°13 registra los desplazamientos entre láminas obtenidos de los ensayos mecánicos en flexión (carga puntual) de las vigas laminadas clavadas conformadas por 8 láminas.

Cuadro N° 13
ENSAYO DE CARGA PUNTUAL EN FLEXIÓN

Laminación vertical								
Deformación total medida al final del ensayo de carga de prueba								
Viga	Lámina 1	Lámina 2	Lámina 3	Lámina 4	Lámina 5	Lámina 6	Lámina 7	Lámina 8
Continua [mm]	14,5	14,8	15,7	17,0	17,4	16,3	15,7	15,4
L_i/L_t [%]	84	86	91	99	100	94	91	89
Empalme [mm]	12,0	12,9	12,5	13,0	13,1	12,6	12,0	11,1
L_i/L_t [%]	92	99	96	100	100	97	92	86

Nota: L_i : Deformación de la lámina i. L_t : Deformación total

El R^2 obtenido en el ajuste de las rectas del tramo de carga 1 y 2, es en todos los casos superior al $R^2 = 0,99$, por lo que se considera que las pendientes m_1 y m_2 son representativas de la relación carga deformación en ese tramo.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Ensayos de Uniones Clavadas

De la estadística descriptiva señalada en los Cuadros N°5 a N°12 se observa que los coeficientes de variación en 49 de los 58 resultados son inferiores a 25%, lo que se considera adecuado para este tipo de ensayos.

Las probetas con uniones clavadas ensayadas en compresión perpendicular y tracción paralela alcanzaron una carga máxima característica unitaria de 1.106 (N) y 1.067 (N), respectivamente. Si se aplica un factor de seguridad 3, se obtiene que el valor admisible para estos ensayos queda como 369 (N) y 356 (N), respectivamente. El valor admisible considerado para la falla por cizalle simple (falla tipo IV, según NCh 1198) para este tipo de unión es de 358 (N). De lo anterior se puede deducir que el factor de seguridad 3 se ajusta al valor propuesto por la NCh 1198.

Los módulos de deslizamiento K_i , K_s y las pendientes del tramo m_1 y m_2 presentan valores inferiores para los ensayos de compresión perpendicular en comparación con los de tracción paralela. Cabe destacar que los valores para el ensayo de tracción están corregidos dividiendo la deformación medida proporcionalmente entre las 2 uniones que conforman la probeta.

El Cuadro N°14 registra las relaciones de carga-deslizamiento características unitarias, medidas en K_i , K_s , m_1 , m_2 comparada con los valores de corrimiento entregados por las normas NCh 1198 y EN 1995-1 (UNE, 2016).

Cuadro N°14
PARÁMETROS DE CORRIMIENTO

Parámetro de corrimiento	Compresión perpendicular [N/mm]	Tracción paralela [N/mm]
k_i	257	378
k_s	233	396
m_1	332	376
m_2	507	658
Módulo corrimiento, NCh1198	512	
Módulo corrimiento, EN 1995-1 (K_s)	620	

El valor del módulo de corrimiento medido en compresión perpendicular para los parámetros de k_i , k_s , m_1 , m_2 son menores que el valor teórico calculado según la NCh 1198 y EN 1995-1. Esto se repite para el ensayo de tracción paralela con la salvedad de que el valor medido en m_2 es mayor que el propuesto por la norma chilena y europea.

Dado que según NCh 1198 el corrimiento viene dado por la razón entre el P_{ad} y el módulo de corrimiento. El Cuadro N° 15 presenta los valores de corrimiento en función del diámetro del clavo.

Cuadro N°15
CORRIMIENTO MEDIDO

Parámetro de corrimiento		Corrimiento para P_{ad}
Compresión perpendicular	k_i	0,5 *dc
	k_s	0,5 *dc
	m_1	0,4 *dc
	m_2	0,3 *dc
Tracción paralela	k_i	0,3 *dc
	k_s	0,3 *dc
	m_1	0,3 *dc
	m_2	0,2 *dc
Módulo corrimiento, NCh1198		0,2 *dc

Se observa que el módulo de corrimiento considerado por la norma europea para un clavo 3" (75 mm, Ø2.8mm) es mayor que el considerado en la NCh 1198. Se destaca que los procedimientos usados en sus determinaciones son distintos, ya que las ponderaciones de los parámetros involucrados en el deslizamiento (densidad ρ_m , diámetro d , tensión del acero $F_{\#}$) son diferentes.

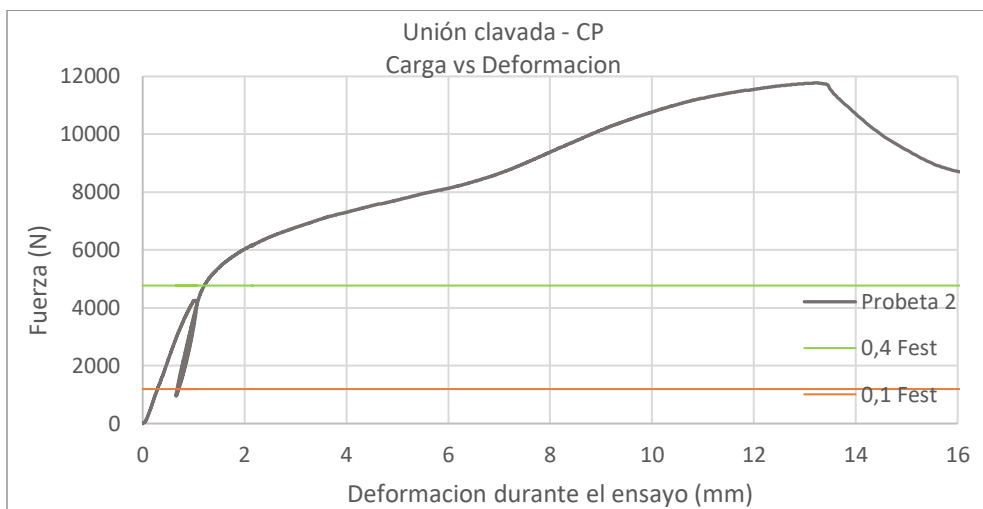
Se destaca que el valor más alto se presenta en el análisis de la pendiente del segundo intervalo de carga (m_2), entre el 10% (v_{21}) y el 40% (v_{24}) de la carga esperada, lo que denota un aumento en la rigidez de la unión para ese tramo de carga, posterior a una primera solicitación.

Los resultados del ensayo de compresión perpendicular, son menores a los obtenidos en tracción paralela, donde se registró una menor deformación por unidad de carga en las uniones clavadas.

Las probetas con uniones clavadas ensayadas en compresión perpendicular y tracción paralela alcanzaron una carga máxima característica unitaria de 1.106 (N) y 1.067 (N), respectivamente. El valor admisible considerado para la falla por cizalle simple (falla tipo IV, según NCh 1198) para este tipo de unión es de 358 (N).

El comportamiento de las probetas en el tramo v_1 a v_4 y v_{21} a v_{24} evidencia que el límite de proporcionalidad se encuentra entre el 10% y el 40% de la carga máxima estimada para la unión clavada, que se evidencia en el Gráfico N°1 siguiente:

Gráfico N°1
Deslizamiento de la unión clavada en compresión perpendicular



5.2. Ensayos de Flexión en Laminados Clavados

Los Cuadros N°11 y N°12 constatan que la rigidez de las vigas laminadas clavadas con laminación vertical es mayor que las registradas en las vigas con laminación horizontal, tanto para laminación continua y como con empalmes a tope.

Las vigas con laminación vertical continua presentan resistencia y rigidez global mayor que las con laminación vertical y empalme a tope, siendo en promedio un 28,7% y 23,9% mayores, respectivamente. En el caso de las vigas con laminación horizontal, no se presentan diferencias significativas en la rigidez medida.

El Cuadro N°16 registra las propiedades de rigidez y momento admisible de los distintos tipos de laminados clavados fabricados y ensayados como parte de este estudio.

Cuadro N°16
RIGIDEZ DE LOS DISTINTOS TIPOS DE ENVIGADO

Viga	Rigidez (EI) kN-m²	Momento admisible* kN-m
Laminado clavado V (205x182mm)	1.025	21,7
Laminad clavado Ve (205x182mm)	827	8,2
Laminado clavado H (182x205mm)	324	-
Laminado clavado He (182x205mm)	333	-

V: Vertical; Ve: vertical con empalme; H: Horizontal; He: Horizontal con empalme

*El momento admisible se determinó con un Límite de Tolerancia Paramétrico (LTP) del 5% con un nivel de confianza del 75% a partir del MOR registrado para las vigas con laminación vertical continua y con empalmes, divido por factor de seguridad 2,1; según indicaciones NCh3028-2 (INN, 2017b).

En términos de rigidez, la laminación vertical continua mantiene las propiedades del grado G1 que se registran en la NCh1198 para una escuadría de 205x182 mm, equivalente a 1.030kN-m². Por su parte, la laminación vertical con empalmes alcanza un 80% de dicho valor mientras que la teoría del código NLT-US *Design and Construction Guide* señala de manera conservadora que esta debería ser un 69%.

De acuerdo con las ecuaciones indicadas en la sección 3.5 de este informe, la capacidad en flexión esperada para el laminado clavado se obtiene de la capacidad estructural de la madera utilizada en su fabricación, en este caso el F_b se refiere al grado G1, es decir, 7,5 MPa. De lo anterior, se tiene que la capacidad estimada de momento admisible para el laminado clavado con laminación vertical continua y con empalmes es 8,49 kN-m y 5,69 kN-m, respectivamente; en tanto que las capacidades evaluadas fueron 15,3 kN-m y 6,4 kN-m, sobre el valor característico (5%LTP con 75% de nivel de confianza) con un factor de seguridad de 3.

Las probetas con empalme presentaron una falla claramente influenciada por el desplazamiento en la zona de la unión de tope en cada uno de los ensayos a rotura. Este efecto se registra en el anexo fotográfico, Figuras N°19 y N°20.

A partir del ensayo de carga puntual se determinó que con una carga de prueba $F_{est}/3$ (3,2 ton para el laminado clavado continuo; 2,5 ton para el laminado clavado con empalme) las láminas demuestran un comportamiento heterogéneo respecto de la deformación medida en el punto de carga, presentándose en las láminas laterales hasta un 84% de deformación medida en el centro.

5.3. Capacidad de Servicio

El Cuadro N°17 registra las longitudes máximas alcanzables para las vigas laminadas clavadas en condición de servicio, determinadas con las propiedades mecánicas registradas el Cuadro N°16; además de las que registran otros elementos estructurales disponibles en el comercio.

Cuadro N°17
LUZ MÁXIMA ALCANZABLE POR TIPO DE VIGA LAMINADA CLAVADA Y ESPACIAMIENTO

Viga laminada clavada, luz máxima (m)						
Deformación	L/480 (200 kg/m ²)			L/360 (250 kg/m ²)		
Espaciamiento	305 mm	406 mm	610 mm	305 mm	406 mm	610 mm
Laminado clavado V continuo (5 Láminas de 41x182mm, clavado doble fila @120mm)	5,9	5,4	4,7	6,0	5,4	4,8
Laminado clavado V empalme (5 Láminas de 41x182mm, clavado doble fila @120mm, empalme escalonado a 1m)	5,5	5,0	4,4	5,6	5,1	4,4
Viga-I 241 mm	4,3	4,0	3,4	4,4	4,0	3,5
Viga-I 301 mm	5,2	4,7	4,1	5,3	4,8	4,2
2x8 G1 (41x185 mm)	3,2	3,0	2,5	3,3	3,0	2,6
2x10 G1 (41x230 mm)	4,0	3,7	3,2	4,0	3,8	3,3

Nota: Cargas de piso de acuerdo a la norma NCh 1537 (INN, 1986)

Se destaca que las magnitudes en el cuadro anterior solo consideran factores de reducción por contenido de humedad y duración de carga, de acuerdo a NCh 1198.

6. CONCLUSIONES

Las relaciones de carga deslizamiento medidas en los ensayos de tracción fueron ligeramente superiores a las medidas en los ensayos de compresión perpendicular, lo que puede deberse a la diferencia en orientación de la fibra respecto del esfuerzo que solicita a la unión clavada. Cabe destacar la norma NCh 1198 no hace diferencia en la orientación de la fibra para este diámetro de clavo.

Se puede verificar que la unión tiene un comportamiento dúctil ya que la deformación en la carga máxima, es muy superior a 4 veces el corrimiento para el P_{ad} .

Dados los coeficientes de variación obtenidos y el número de repeticiones ejecutadas, se observa la necesidad de realizar una mayor cantidad de ensayos con diferentes diámetros de clavo. Sin embargo, es posible identificar señales de que la norma NCh 1198 subestima el corrimiento ocurrido en las uniones clavadas.

La muestra observada de vigas lamiadas clavadas materializadas con madera aserrada estructural de Pino radiata grado G1, entregaron resultados que se adecuan a lo esperado bajo los criterios del código NLT-US *Design and construction guide*, sin embargo, es necesario aumentar la cantidad de repeticiones del ensayo para considerar un nivel de confianza superior.

Cabe mencionar que este estudio debe ser complementado con ensayos adicionales que permitan determinar las propiedades mecánicas del acero de los medios de unión, diámetros y

esquemas de clavado con y sin perforación, distintos grados estructurales y especies de madera. Esto con el fin de actualizar los capítulos de uniones clavadas e incorporar una metodología que permita determinar analíticamente las capacidades de una viga laminada clavada.

7. REFERENCIAS

NLT U.S (2017). Design & Construction Guide v1.0, 2017. In: <https://www.rethinkwood.com>

NDS (2018). National Design Especifications. American Wood Council. <https://awc.org/publications/2018-nds/>

UNE, 2010. EN, 2010. UNE-EN 338. Madera estructural. Clases resistentes. Normalización Española. En <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0057443>

UNE (1991). EN, 1991. UNE-EN 26891-1. Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Principios generales para la determinación de las características de resistencia y deslizamiento. Normalización Española. En: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0011097>

UNE (2012). EN, 2012. UNE-EN 408. Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Normalización Española. En: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0049928>

UNE (2016). EN, 2016. UNE-EN 1995-1-1. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. En: <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-1995-1-2-2016-n0056511>

Jiménez, G. (1990). Capacidades admisibles de medios de unión mecánicos elaborados de madera microlaminada. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

INN (1986). Diseño Estructural de Edificios – Cargas Permanentes y Sobrecargas de Uso. Instituto Nacional de Normalización, Chile.

INN (1991). Madera - Construcciones en Madera – Cálculo. Instituto Nacional de Normalización, Chile.

INN (2017b). NCh 3028/2:2017. Madera estructural - Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia - Parte 2: Muestreo y evaluación de los valores característicos de piezas en tamaño estructural. Instituto Nacional de Normalización, Chile. En: <https://ecommerce.inn.cl/nch30282201760206>

8. ANEXO

8.1 Fotografías

En las probetas de los ensayos de compresión perpendicular y tracción paralela se presentaron en todos los casos fallas por cizalle simple de la unión clavada, donde se considera como punto de falla cuando la carga llega por debajo de un 80% respecto de la carga máxima alcanzada.

Las Figuras N°15 y N°16 muestran los tipos de fallas encontradas en los ensayos ejecutados en uniones clavadas.



Figura N° 15
FALLA TÍPICA COMPRESIÓN PERPENDICULAR



Figura N° 16
FALLA TÍPICA EN TRACCIÓN PARALELA

En los ensayos de flexión la falla ocurrió entre en el tercio central del elemento laminado clavado, en particular en las probetas que presentaron uniones del tipo empalme, estos se encontraron siempre en el punto de desarrollo de la falla. Las Figuras N°17 a N°20 muestran las fallas encontradas en los ensayos flexión para elementos laminados clavados continuos y con empalmes.



Figura N° 17
FALLA TÍPICA EN FLEXIÓN LAMINACIÓN
VERTICAL CONTINUA



Figura N° 18
FALLA TÍPICA EN FLEXIÓN LAMINACIÓN
VERTICAL CONTINUA



Figura N° 19
FALLA TÍPICA EN FLEXIÓN LAMINACIÓN
VERTICAL CON EMPALME

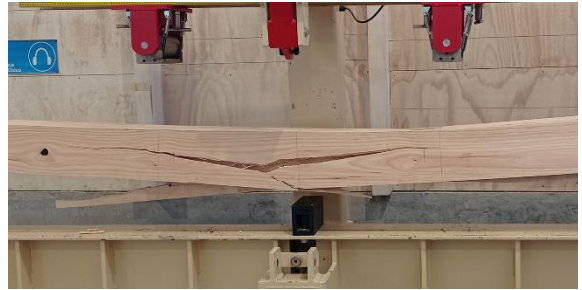


Figura N° 20
FALLA TÍPICA EN FLEXIÓN LAMINACIÓN
VERTICAL CON EMPALME

8.1 Gráficos Representativos de los Ensayos

Los gráficos N°2 a N°7 corresponden a la relación carga vs deformación obtenidos en los ensayos ejecutados a probetas de uniones clavadas y vigas laminadas clavadas.

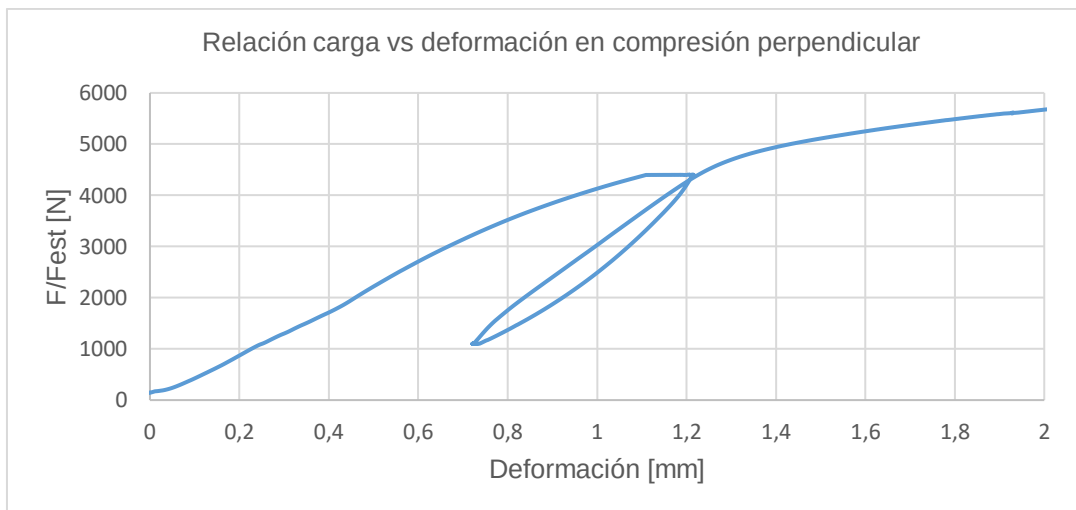


Gráfico N° 2
GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN EN COMPRESIÓN PERPENDICULAR

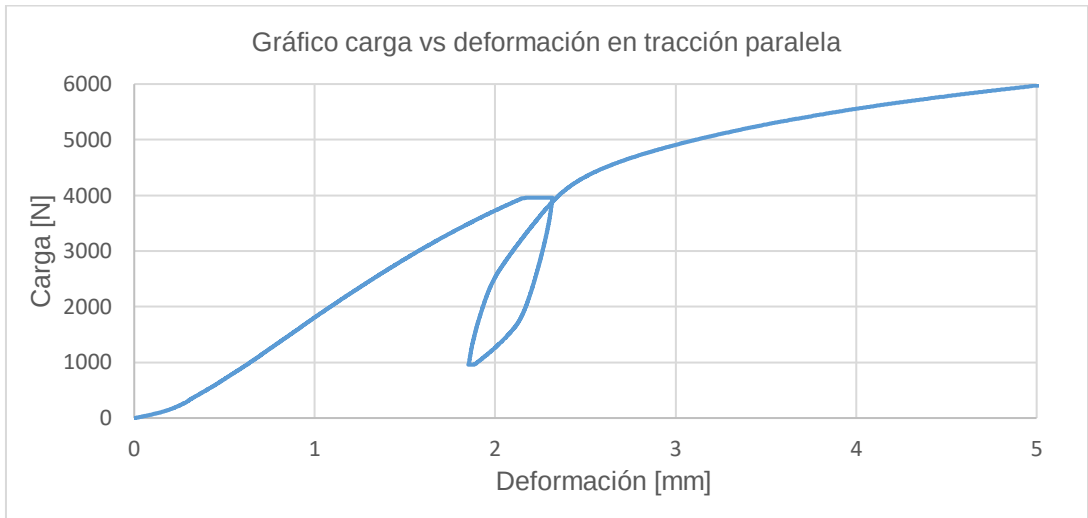


Gráfico N° 3
GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN EN TRACCIÓN PARALELA

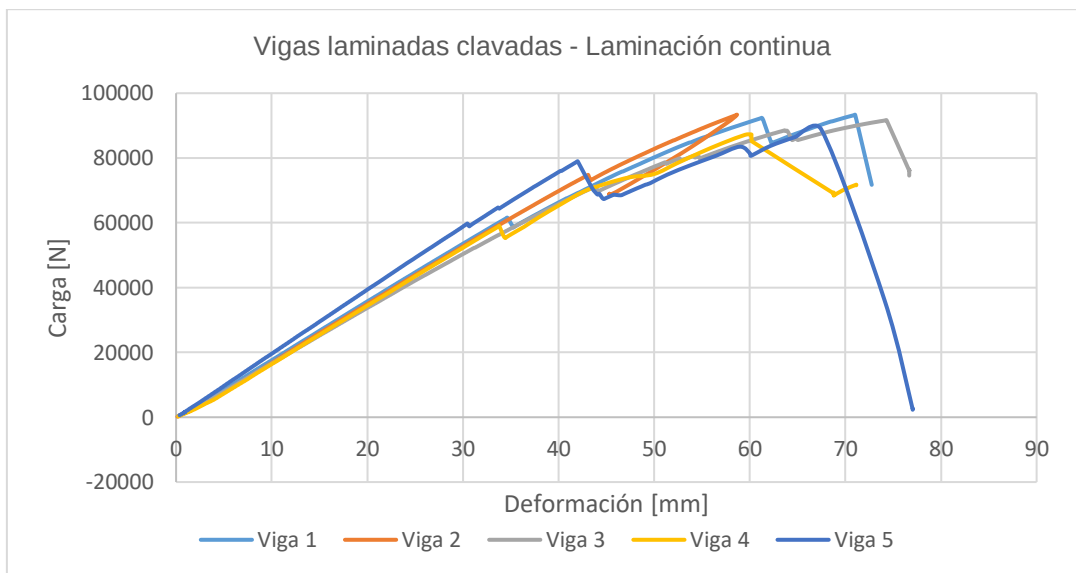


Gráfico N° 4
GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN EN ENSAYO DE FLEXIÓN A VIGA LAMINADA CLAVADA CONTINUA

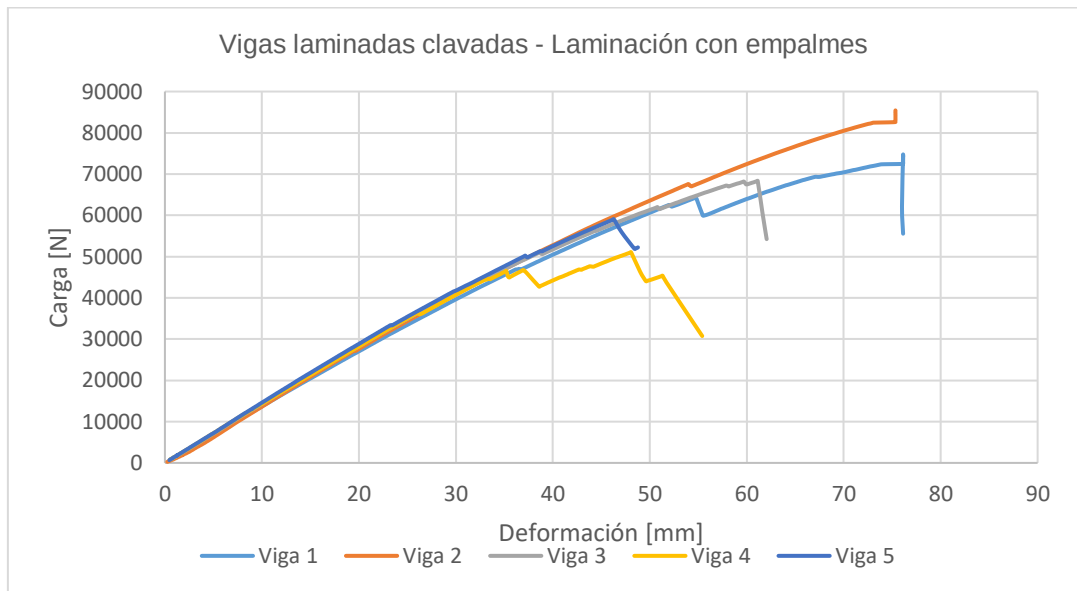


Gráfico N° 5
GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN EN ENSAYO DE FLEXIÓN A VIGA LAMINADA CLAVADA CON EMPALMES

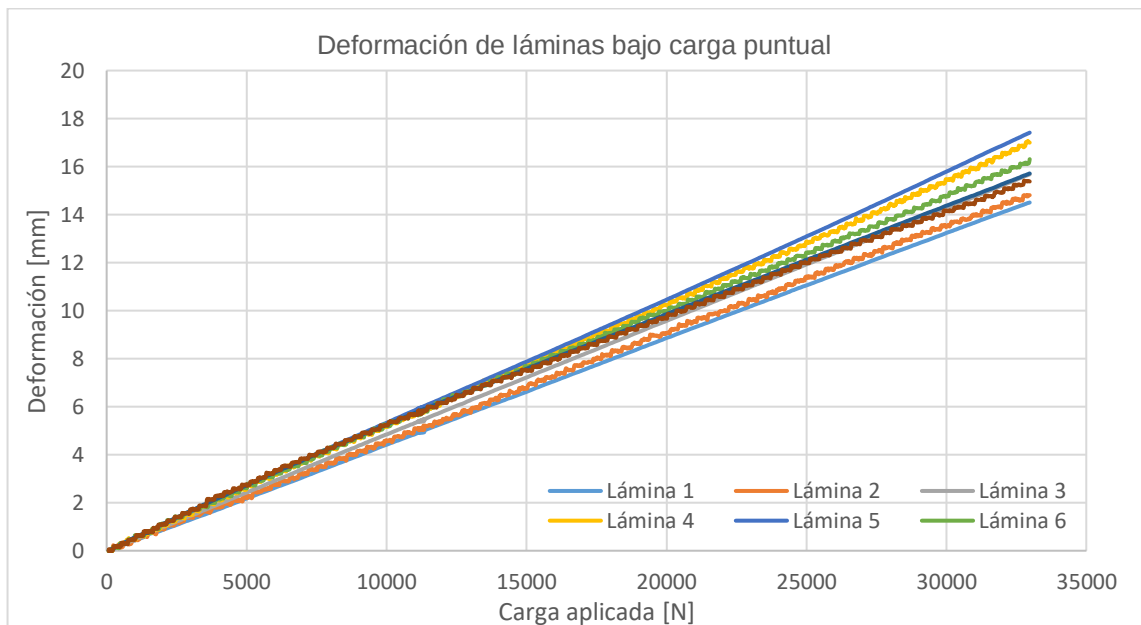


Gráfico N° 6
GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN EN ENSAYO DE FLEXIÓN DE VIGA LAMINADA CLAVADA CON EMPALMES BAJO CARGA PUNTUAL

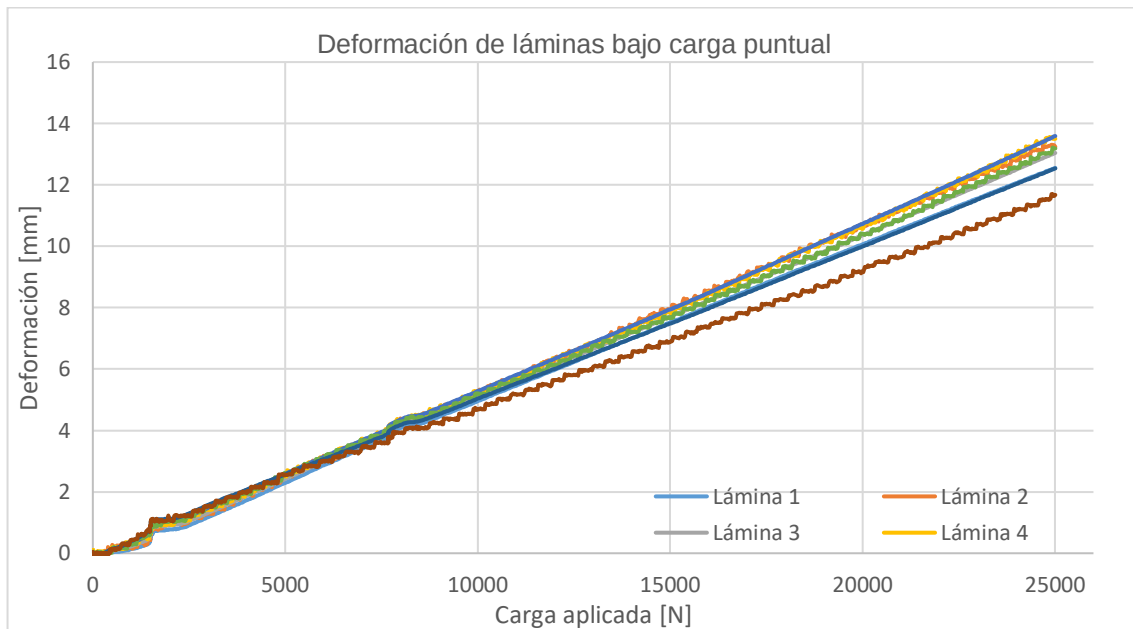


Gráfico N° 7
GRÁFICO DE CARGA VS DEFORMACIÓN EN ENSAYO DE FLEXIÓN DE VIGA LAMINADA
CLAVADA CON EMPALMES BAJO CARGA PUNTUAL



INFOR

www.infor.cl