

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL MADERA LAMINADA ATARUGADA 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 DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL
MADERA LAMINADA ATARUGADA FABRICADA CON MADERA
ASERRADA ESTRUCTURAL DE PINO RADIATA**

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

**INSTITUTO FORESTAL
2023**

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



INSTITUTO FORESTAL
Sucre 2397, Ñuñoa, Santiago
Chile
F. 56 2 223667115
www.infor.cl

ISBN N° 978-956-318-271-2
Registro Propiedad Intelectual N° 2024-A-969

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 (2023). Caracterización Mecánica del Elemento Estructural Viga Laminada Atarugada Fabricada con Madera Aserrada Estructural de Pino Radiata. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 266. P. 24.

PRÓLOGO

En un complejo escenario de cambio climático, ante el cual Chile es altamente vulnerable; y en un contexto de déficit habitacional en el país, que se estima en unas 650.000 viviendas, surge la necesidad de utilizar materiales de construcción que tengan como característica principal un bajo impacto ambiental, es decir, que en producción y aplicaciones presenten bajas huellas de carbono y agua y que, además, permitan aumentar de manera significativa la rapidez en la construcción.

La madera reúne todos esos beneficios y destaca con holgura sobre otros materiales; es un recurso renovable, reciclable, versátil, permite edificar en altura, es un buen aislante térmico, tiene beneficios para la salud de las personas y sus construcciones presentan un buen comportamiento frente a los sismos.

Además, el uso de la madera en la construcción de viviendas tiene un significativo impacto social, dada la generación de empleo que provee la industria del aserrío. El año 2022 más de 15 mil personas trabajaron en los 852 aserraderos funcionando entre Valparaíso y Magallanes, los que en un 98% corresponden a pymes.

Desde sus inicios el Instituto Forestal (INFOR) ha estudiado las maderas provenientes de los bosques nativos y las plantaciones, determinando sus propiedades físicas y mecánicas y sus aptitudes de uso. Más recientemente ha prestado especial atención a los tableros (OSB, contrachapados) y a la madera aserrada estructural destinada a la fabricación de componentes para las viviendas, entre ellos los elementos laminados.

Este estudio permite evaluar las capacidades mecánicas de las uniones atarugadas fabricadas con madera aserrada estructural de pino radiata y tarugos de coihue, y su comportamiento en elementos laminados atarugados, tales como viga y losas.

El financiamiento de este trabajo proviene del Ministerio de Agricultura (MINAGRI), a través del Convenio 2023 suscrito con INFOR, y fue ejecutado por los profesionales del área de investigación de Tecnología y Productos de Madera de INFOR.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO	1
3. MATERIAL Y MÉTODO	1
3.1. Material Experimental	1
3.2. Diseño Experimental	2
3.3. Ensayos Mecánicos	3
3.3.1. Ensayo a la compresión perpendicular, unión atarugada	3
3.3.2. Ensayo a la compresión paralela, unión atarugada	4
3.3.3. Ensayo a la flexión, viga atarugada	5
3.4. Metodología para Determinar la Fuerza y Deformación Características en Estructuras de Madera con Uniones Atarugadas	5
3.4.1. Mediciones del deslizamiento	5
3.4.2. Relaciones de carga deformación	6
3.5. Resistencia Mecánica del Elemento Estructural Madera Laminada Atarugada	7
4. RESULTADOS	8
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	13
5.1. Estadística Descriptiva de los Resultados	13
5.2. Deslizamiento de la Unión Atarugada	15
5.3. Comparación Rigidez de las Vigas Laminadas Atarugadas con Otros Tipos de Envigado	17
6. CONCLUSIONES	18
7. REFERENCIAS	19
8. ANEXO - FOTOGRAFÍAS Y CURVAS DE CARGA DEFORMACIÓN	20

1. INTRODUCCIÓN

En la búsqueda constante de soluciones arquitectónicas que combinen la estética con la sostenibilidad, la elección de construir con madera masiva se presenta como una opción cada vez más atractiva. La madera, como material de construcción, ha sido durante mucho tiempo apreciada por su calidez y belleza natural, pero hoy en día, su uso va más allá de la estética. La sostenibilidad ambiental es un factor crucial en la toma de decisiones y la madera masiva se destaca por su bajo impacto ambiental en comparación con otros materiales de construcción.

Los elementos laminados atarugados (dowel laminated timber, DLT) son un producto de madera masiva que puede utilizarse en estructuras de suelo, pared y techo. Estos paneles sólidos de madera aserrada utilizan tarugos de madera dura para ensamblar por fricción tableros pre-fresados en posición vertical, creando un panel especialmente eficiente para luces horizontales y permitiendo un diseño estructural más flexible.

Los paneles DLT son el único producto de madera masiva completamente de madera, ya que no consideran adhesivos ni clavos. Sin sujetadores metálicos, los paneles DLT pueden procesarse fácilmente con maquinaria CNC, creando un panel de alta tolerancia que también puede contener materiales acústicos previamente integrados, conductos eléctricos y otras interfaces de servicios.

El DLT, como producto de madera masiva, se pueden integrar de manera económica a una amplia variedad de perfiles en la superficie inferior del panel. Cada tablero ensamblado con juntas mecanizadas permite explorar y exponer una gama ilimitada de perfiles diferentes en la parte inferior de un panel. Se puede producir un perfil acústico para lograr objetivos de reducción de ruido, al mismo tiempo que se mantiene la madera expuesta y se permite una variedad de acabados superficiales.

2. OBJETIVO

Este estudio permite evaluar las capacidades mecánicas de las uniones atarugadas fabricadas con madera aserrada estructural de Pino radiata y tarugos de Coihue, y su comportamiento en elementos laminados atarugados, tales como viga y losas.

3. MATERIAL Y MÉTODO

Este estudio se desarrolló en 2 etapas. En la primera, se evaluó el comportamiento de las uniones atarugadas con ensayos a la compresión perpendicular y paralela a la fibra. En la etapa 2, en tanto, se ensayaron vigas y losas atarugadas de dimensiones mayores, considerando laminación vertical, y 2 configuraciones de fabricación: continua y empalme a tope.

3.1. Material Experimental

Se utilizó madera aserrada estructural (MAE) de pino radiata, 12% (± 3) de contenido de humedad, escuadría 41x185 mm, cepillada y con clasificación estructural visual G1.

Los tarugos se fabricaron con madera de coihue de 5/8" ($\varnothing 15,8\text{mm}$) y su hincado en la MAE se ejecutó con un cilindro hidráulico, considerando una perforación previa de $\varnothing 15\text{mm}$.

Las probetas destinadas a los ensayos de uniones atarugadas (compresión perpendicular y paralela a la fibra) se fabricaron con piezas de hasta 0,4 m de largo.

Se fabricaron 2 tipologías de vigas laminadas atarugadas; sin empalmes, con láminas de 4 m de largo; y con empalmes, fabricadas con láminas de 1-2-3 y 4 m de largo. Se consideró un patrón de atarugado en 2 filas, separadas entre sí a 85 mm, con 50 mm de distancia al borde cargado y 50 mm al borde descargado. Para cumplir con el distanciamiento mínimo indicado por la NCh 1198 (INN, 2014), que se observa en el Cuadro N°1, se consideró una separación longitudinal entre tarugos de 150 mm. La Figura N°2 muestra el patrón de atarugado utilizado.

Cuadro N°1
Espaciamientos mínimos de pasadores de acuerdo al diámetro D

Separación mínima		Diámetro (mm)
Entre pasadores	Paralelo (Sp)	5 D
	Perpendicular (Sn)	3 D
Desde el borde cargado	Paralelo (Sbcp)	7 D
	Perpendicular (Sbcn)	3 D
Desde el borde descargado	Paralelo (Sbdp)	3 D
	Perpendicular (Sbdn)	3 D

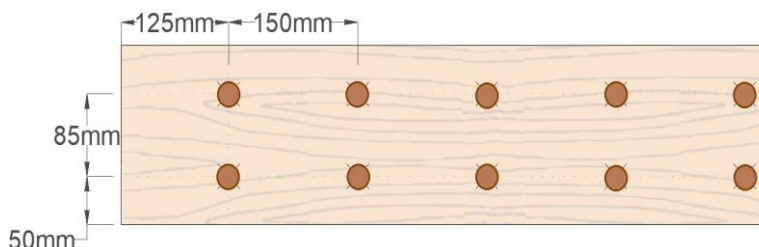


Figura N° 2. Espaciamiento del atarugado

Adicional a los ensayos de uniones atarugadas y vigas laminadas atarugadas, se fabricaron y ensayaron a la flexión, con el esquema de carga puntual, 2 losas laminadas atarugadas, cada una de ellas conformada por 10 láminas de 4 m de largo, sin empalmes, y con el mismo patrón de atarugado que las vigas

3.2. Diseño Experimental

En el Cuadro N°2 se registra el diseño experimental de la etapa 1, que considera la determinación de la razón fuerza/deslizamiento en uniones atarugadas en falla por cizalle doble.

Cuadro N°2
Diseño experimental etapa 1, uniones atarugadas

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

En el Cuadro N°3 se registra el diseño experimental de la etapa 2, que considera la determinación de las capacidades de resistencia y rigidez en flexión para las vigas laminadas atarugadas.

Cuadro N°3
Diseño experimental etapa 2, vigas atarugadas

Variable	Cantidad
Grado estructural de la madera	1 (G1)
Escuadría	1 (41x185mm)
Tipo de elemento	2 (Laminación vertical, con empalme y continua)
Ensayos	1 (Flexión)
Repeticiones	5
Número de ensayos	10

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 de ensayos con acreditación NCh-ISO 17025, ubicado en la Sede Biobío de INFOR en Concepción.

3.3.1. Ensayo a la compresión perpendicular, unión atarugada

El ensayo a la compresión perpendicular fue ejecutado según indicaciones de la norma EN 26891 (UNE, 1991) que permite evaluar la relación de carga y deslizamiento en uniones mecánicas en madera estructural.

La Figura N°3 registra el esquema del ensayo a la compresión perpendicular y su implementación en el laboratorio. Considera una carga en las piezas laterales que se trasmite a los planos de corte que se forman con la pieza central.

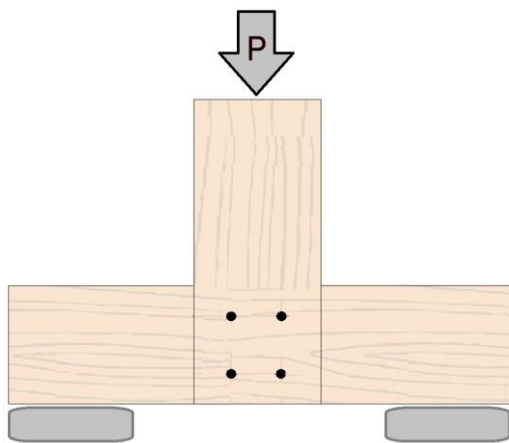


Figura 3. A) Esquema del ensayo a la compresión perpendicular



B) Implementación del ensayo a la compresión perpendicular

3.3.2. Ensayo a la compresión paralela, unión atarugada

El ensayo a la compresión paralela fue ejecutado según indicaciones de la norma EN 26891 (UNE, 1991) que permite evaluar la relación de carga y deslizamiento en uniones mecánicas en madera estructural.

La Figura N°4 registra el esquema del ensayo a la compresión paralela y su implementación en el laboratorio. Considera una carga en la pieza central que se transmite a los planos de corte que se forman con las piezas laterales.

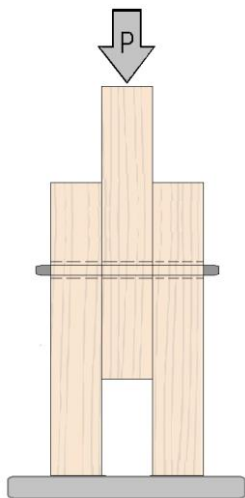
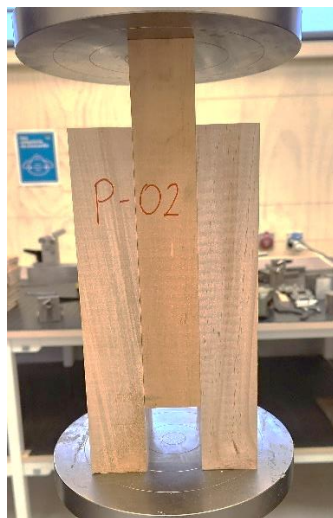


Figura 4. A) Esquema de ensayo compresión paralela.



B) Implementación ensayo de compresión paralela.

3.3.3. Ensayo a la flexión, viga atarugada

El ensayo a la flexión de cuatro puntos fue ejecutado según indicaciones de la norma EN 408 (UNE, 2012), que es equivalente en este punto con NCh 3028-1 (INN, 2017a), y permite determinar los parámetros de rigidez (EI) y carga de rotura en elementos tipo viga dispuestas de canto, incluyendo elementos compuestos, tales como las vigas laminadas atarugadas.

Las Figuras N°5 y N°6 registran los esquemas del ensayo y su implementación en el laboratorio, respectivamente.

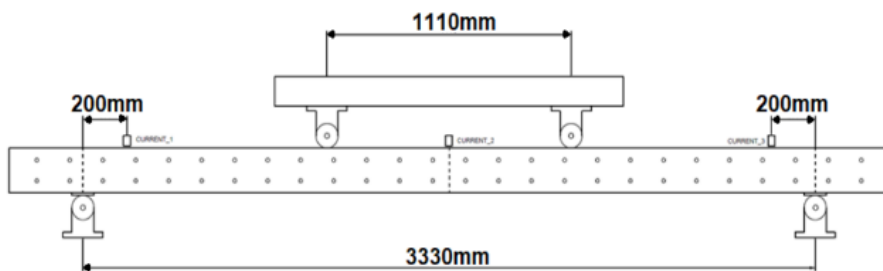


Figura N°5
Esquema del ensayo en flexión

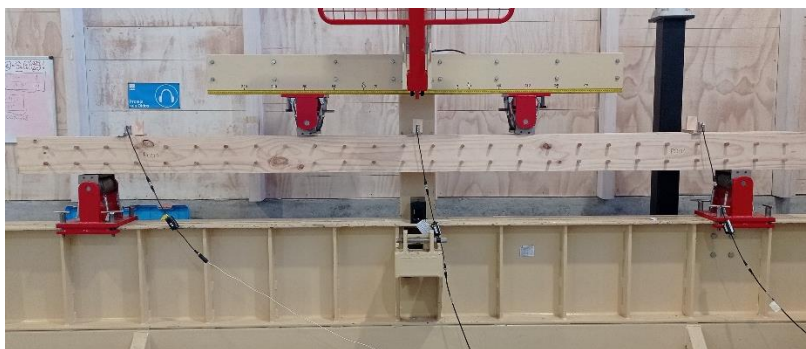


Figura N°6
Implementación del ensayo en flexión

3.4. Metodología para Determinar la Fuerza y Deformación Características en Estructuras de Madera con Uniones Atarugadas

3.4.1. Mediciones del deslizamiento

Se registraron las mediciones de deslizamiento desde los puntos v_{01} a v_{28} (Figura N°7A), las que están asociados a intervalos del ciclo de carga estipulado por la norma EN 26891 (UN, 1991) (Figura N°7B); tomando como referencia la carga máxima esperada para un grupo de

probetas con un mismo tipo de unión. El análisis estadístico de la información se ejecutó según las indicaciones de EN 14358 (UNE, 2016) y NCh 3028-2 (INN, 2017b)

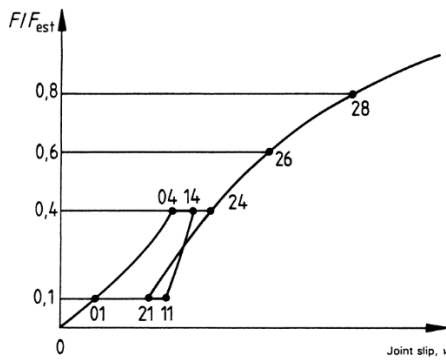
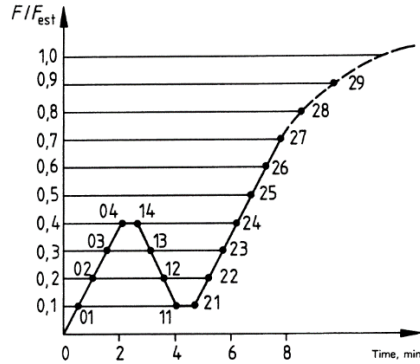


Figura 7. A) Esquema de ensayo compresión



B) Implementación ensayo de compresión

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

3.4.2. Relaciones de carga deformación

A partir de los puntos registrados se obtiene una caracterización del comportamiento de la unión, considerando: carga máxima alcanzada por el medio de unión, el deslizamiento inicial, deslizamiento inicial modificado, el asentamiento de la unión, el deslizamiento elástico, el módulo inicial de deslizamiento, el módulo de deslizamiento, deslizamiento al 60% y 80% de la carga máxima.

Deslizamiento inicial

$$v_{04}$$

Deslizamiento inicial modificado

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

Asentamiento de la unión

$$v_s = v_i - v_{i,mod}$$

Deslizamiento elástico

$$v_e = \frac{2}{3}(v_{14} + v_{24} - v_{11} - v_{21})$$

Módulo inicial de deslizamiento

$$k_i = 0,4F_{est}/v_i$$

Módulo de deslizamiento

$$k_s = 0,4F_{est}/v_{i,mod}$$

Deslizamiento 60% modificado

$$v_{0,6,mod} = v_{0,6} - v_{24} + v_{i,mod}$$

Deslizamiento 80% modificado

$$v_{0,8,mod} = v_{0,8} - v_{24} + v_{i,mod}$$

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

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} * d}{23}$$

Donde:

ρ_m : Densidad media de la madera, según EN 338 (kg/m³)
 d : Diámetro del pasador (mm)

Según NCh 1198, el módulo de corrimiento en pasadores solicitados al cizalle doble se determina con la formula siguiente:

$$C_{CM} = 1,2 * P_{ad}$$

Donde:

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

3.5. Resistencia Mecánica del Elemento Estructural Madera Laminada Atarugada

Las siguientes ecuaciones fueron consideradas para determinar las propiedades de resistencia y rigidez de las vigas atarugadas ensayadas bajo cargas concentradas aplicadas en L/2 y L/3 mediante apoyos cilíndricos.

Rigidez en flexión - Ensayo de 4 puntos
$EI = \frac{23}{108} \cdot \frac{L^3}{12} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta d}$

Rigidez en flexión - Ensayo de 3 puntos
$EI = \frac{PL^3}{d48}$

Resistencia en flexión - Ensayo de 4 puntos
$M = \frac{PL}{6}$

Resistencia en flexión - Ensayo de 3 puntos
$M = \frac{PL}{4}$

Donde:

L = Luz entre apoyos
 d = Altura del laminado
 $\frac{\Delta F}{\Delta d}$ = Relación carga/desplazamiento
 P = Carga puntual
 E = Módulo de elasticidad
 I = Momento de inercia

4. RESULTADOS

Los Cuadros N°4 al N°7 registran los puntos y parámetros de deslizamiento, registrados en los ensayos mecánicos de las uniones atarugadas sometidas a las cargas de compresión perpendicular y paralela.

Cuadro N°4
Puntos de deslizamiento durante el ensayo de compresión perpendicular

Probeta N°	Deformación en cada estado de carga (mm)							
	V _{0,1}	V _{0,4}	V ₁₄	V ₁₁	V ₂₁	V ₂₄	V _{0,6}	V _{0,8}
1	0,90	1,37	1,39	1,11	1,10	1,74	2,27	2,87
2	0,99	1,49	1,51	1,21	1,21	1,96	2,61	3,84
3	1,04	2,04	2,07	1,42	1,41	2,08	2,63	3,73
4	0,92	1,71	1,74	1,14	1,13	1,75	2,36	3,30
5	0,98	1,84	1,88	1,23	1,23	1,89	2,48	3,26
6	0,92	1,69	1,72	1,14	1,14	1,73	2,25	2,87
7	0,80	1,48	1,50	0,94	0,93	1,50	1,99	2,60
8	0,99	1,77	1,79	1,21	1,21	1,80	2,31	2,96
9	0,94	1,77	1,80	1,15	1,15	1,81	2,44	3,33
10	0,91	1,67	1,69	1,12	1,12	1,75	2,25	4,53
11	0,88	1,61	1,64	1,05	1,05	1,64	2,21	3,07
12	1,03	1,83	1,86	1,26	1,26	1,87	2,38	3,05
13	0,93	1,61	1,61	1,07	1,07	1,63	2,13	2,84
14	0,91	1,69	1,72	1,15	1,15	1,73	2,27	3,02
15	0,92	1,71	1,74	1,14	1,13	1,75	2,34	3,62
16	1,01	1,86	1,89	1,31	1,30	1,89	2,43	3,10
17	0,88	1,59	1,61	1,08	1,07	1,62	2,11	2,71
18	0,99	1,85	1,87	1,29	1,29	1,88	2,40	3,02
19	1,03	1,92	1,94	1,32	1,31	1,94	2,46	3,19
20	0,96	1,95	1,97	1,27	1,26	1,98	2,57	3,43
21	0,97	1,93	1,96	1,26	1,25	1,97	2,67	4,96
22	0,97	2,01	2,04	1,27	1,26	2,05	2,76	5,55
23	1,17	2,06	2,08	1,47	1,46	2,09	2,68	3,60
24	1,28	2,80	2,84	2,10	2,09	2,89	3,58	4,43
25	1,16	2,20	2,23	1,50	1,50	2,24	2,93	4,00
26	1,03	1,91	1,93	1,26	1,25	1,94	2,62	4,67
27	0,91	1,64	1,67	1,11	1,10	1,67	2,19	2,94
28	1,02	1,83	1,85	1,27	1,27	1,86	2,37	3,10
29	1,09	2,05	2,07	1,33	1,32	2,09	2,76	3,77
30	1,05	1,89	1,91	1,25	1,24	1,92	2,55	3,39

Cuadro N° 5
Parámetros de deslizamiento en ensayo de compresión perpendicular

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	1,37	0,63	0,74	2.039	4.442	1,15	1,75
2	1,49	0,67	0,82	1.878	4.192	1,32	2,55
3	2,04	1,33	0,71	1.371	2.099	1,89	2,99
4	1,71	1,05	0,66	1.636	2.665	1,66	2,60
5	1,84	1,16	0,69	1.519	2.418	1,75	2,53
6	1,69	1,03	0,67	1.654	2.725	1,55	2,17
7	1,48	0,90	0,57	1.893	3.095	1,39	2,00
8	1,77	1,04	0,73	1.582	2.680	1,55	2,20
9	1,77	1,10	0,67	1.581	2.540	1,73	2,62
10	1,67	1,01	0,66	1.680	2.780	1,51	3,79
11	1,61	0,97	0,64	1740	2.890	1,53	2,40
12	1,83	1,07	0,76	1.527	2.608	1,58	2,26
13	1,61	0,91	0,70	1.744	3.088	1,41	2,12
14	1,69	1,04	0,65	1.654	2.683	1,59	2,33
15	1,71	1,06	0,65	1.635	2.634	1,65	2,93
16	1,86	1,13	0,73	1.502	2.472	1,67	2,34
17	1,59	0,95	0,65	1.756	2.952	1,44	2,04
18	1,85	1,14	0,70	1.515	2.447	1,66	2,28
19	1,92	1,17	0,74	1.462	2.385	1,70	2,42
20	1,95	1,32	0,63	1.436	2.126	1,90	2,76
21	1,93	1,27	0,65	1.454	2.202	1,97	4,27
22	2,01	1,39	0,62	1.391	2.017	2,10	4,89
23	2,06	1,18	0,88	1.359	2.363	1,77	2,69
24	2,80	2,03	0,77	999	1.381	2,72	3,57
25	2,20	1,39	0,81	1.273	2.016	2,08	3,16
26	1,91	1,17	0,74	1.468	2.388	1,85	3,90
27	1,64	0,97	0,67	1.704	2.872	1,49	2,24
28	1,83	1,08	0,76	1.528	2.600	1,58	2,31
29	2,05	1,28	0,77	1.368	2.190	1,95	2,96
30	1,89	1,13	0,76	1.481	2.484	1,76	2,60

Cuadro N° 6
Puntos de deslizamiento durante el ensayo de compresión paralela

Probeta N°	Deformación en cada estado de carga [mm]							
	V _{0,1}	V _{0,4}	V ₁₄	V ₁₁	V ₂₁	V ₂₄	V _{0,6}	V _{0,8}
1	0,62	0,93	0,94	0,76	0,76	0,95	1,17	1,48
2	0,58	0,98	1,00	0,80	0,80	1,01	1,32	1,75
3	0,64	1,18	1,20	0,94	0,94	1,23	1,58	2,05
4	0,93	1,44	1,46	1,18	1,17	1,46	1,80	2,30
5	0,78	1,44	1,48	1,19	1,18	1,49	1,91	2,63
6	0,69	1,26	1,29	1,00	0,99	1,30	1,73	2,25
7	1,02	1,59	1,63	1,35	1,34	1,64	2,05	2,80
8	0,57	0,94	0,96	0,79	0,79	0,97	1,25	1,69
9	0,59	0,91	0,92	0,72	0,72	0,92	1,17	1,54
10	0,73	1,13	1,15	0,92	0,91	1,16	1,49	2,07
11	0,68	1,01	1,02	0,80	0,80	1,03	1,24	1,49
12	0,62	0,97	0,99	0,78	0,78	0,99	1,27	1,73
13	0,61	1,04	1,07	0,82	0,82	1,07	1,38	1,84
14	1,63	2,01	2,03	1,84	1,83	2,04	2,26	2,51
15	0,64	1,03	1,05	0,81	0,81	1,05	1,31	1,66
16	0,58	1,00	1,02	0,80	0,79	1,03	1,34	2,32
17	0,69	1,05	1,07	0,86	0,85	1,08	1,52	1,81
18	0,58	0,93	0,96	0,74	0,74	0,96	1,23	1,62
19	0,59	1,06	1,08	0,87	0,87	1,09	1,44	3,36
20	0,62	0,94	0,96	0,75	0,74	0,97	1,27	1,79
21	0,66	1,08	1,10	0,86	0,86	1,11	1,45	2,00
22	0,64	1,10	1,12	0,88	0,88	1,13	1,43	2,62
23	0,64	0,97	0,98	0,81	0,80	0,99	1,20	1,51
24	0,63	1,22	1,25	0,90	0,89	1,26	1,79	5,45
25	0,65	1,25	1,28	1,03	1,03	1,29	1,64	2,16
26	0,67	1,11	1,13	0,92	0,91	1,14	1,41	1,83
27	0,65	1,10	1,12	0,87	0,86	1,13	1,42	1,79
28	0,80	1,39	1,43	1,13	1,12	1,44	1,88	2,71
29	0,62	0,91	0,92	0,74	0,74	0,92	1,12	1,39
30	0,67	1,23	1,26	0,96	0,96	1,26	1,68	2,39

Cuadro N° 7
Parámetros de deslizamiento en ensayo de compresión 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	0,93	0,42	0,52	3.009	6.745	0,63	0,95
2	0,98	0,54	0,44	2.855	5.184	0,86	1,28
3	1,18	0,72	0,46	2.379	3.889	1,07	1,54
4	1,44	0,68	0,76	1.949	4.117	1,02	1,51
5	1,44	0,87	0,57	1.948	3.220	1,29	2,01
6	1,26	0,76	0,50	2.228	3.686	1,19	1,71
7	1,59	0,76	0,83	1.763	3.671	1,17	1,92
8	0,94	0,50	0,45	2.966	5.634	0,78	1,22
9	0,91	0,42	0,48	3.083	6.604	0,67	1,04
10	1,13	0,54	0,59	2.481	5.222	0,86	1,45
11	1,01	0,43	0,58	2.775	6.454	0,65	0,90
12	0,97	0,46	0,50	2.892	6.032	0,74	1,20
13	1,04	0,58	0,46	2.689	4.832	0,89	1,35
14	2,01	0,52	1,50	1.391	5.419	0,74	0,99
15	1,03	0,52	0,51	2.725	5.391	0,78	1,13
16	1,00	0,56	0,44	2.786	4.958	0,88	1,85
17	1,05	0,47	0,58	2.671	5.917	0,91	1,20
18	0,93	0,47	0,46	2.995	5.943	0,74	1,13
19	1,06	0,62	0,44	2.645	4.524	0,97	2,89
20	0,94	0,44	0,51	2.967	6.409	0,74	1,26
21	1,08	0,57	0,52	2.582	4.921	0,91	1,45
22	1,10	0,61	0,48	2.554	4.563	0,92	2,11
23	0,97	0,44	0,53	2.900	6.404	0,64	0,96
24	1,22	0,78	0,44	2.299	3.580	1,32	4,97
25	1,25	0,81	0,44	2.233	3.449	1,16	1,67
26	1,11	0,60	0,52	2.511	4.688	0,88	1,30
27	1,10	0,61	0,49	2.537	4.583	0,90	1,27
28	1,39	0,79	0,61	2.012	3.561	1,22	2,06
29	0,91	0,39	0,52	3.073	7.250	0,59	0,86
30	1,23	0,74	0,49	2.285	3.794	1,15	1,86

El Cuadro N°8 registra las mediciones de rigidez y momento flector registrados en los ensayos mecánicos de las vigas atarugadas sometidas a las cargas de flexión bajo el esquema de ensayo antes señalado.

Cuadro N° 8
Ensayo de flexión en viga laminada atarugada

Viga	Laminación continua		Laminación con empalme	
	EI [kN-m ²]	Momento flector [kN-m]	EI [kN-m ²]	Momento flector [kN-m]
1	1.028	55,0	894	36,5
2	1.034	39,0	862	45,0
3	1.084	49,0	774	32,9
4	1.039	50,2	828	47,0
5	1.162	51,3	841	49,8

Las Figuras N°8 y N°9 muestran la disposición de los dispositivos usados para medir los deslizamientos entre laminas. El Cuadro N°9 registra los resultados de los ensayos la flexión de 3 puntos, bajo carga concentrada, aplicado a la losa de 10 láminas.

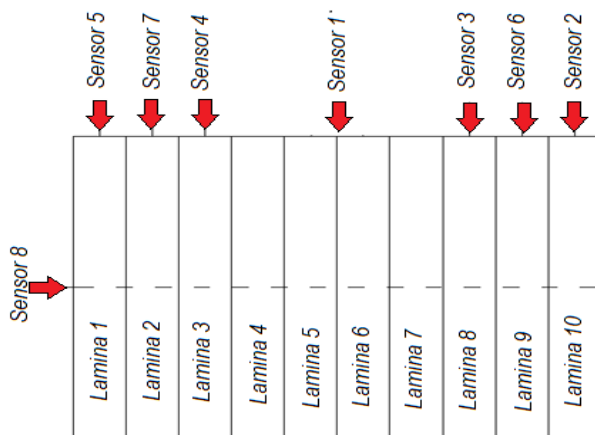


Figura N° 8. Esquema de distribución de láminas y sensores en losa atarugada

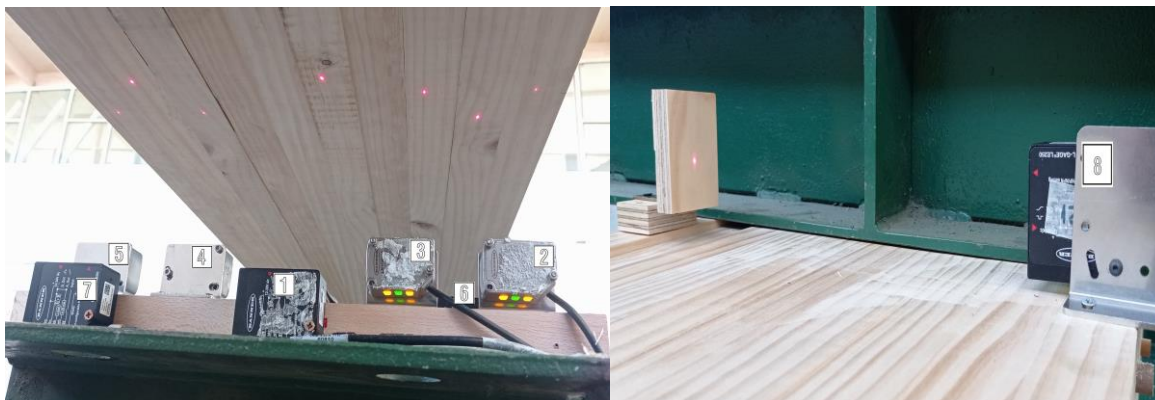


Figura N° 9. Distribución de los sensores en la losa atarugada

**Cuadro N° 9
Ensayo de carga puntual en flexión losa atarugada**

Losa	Laminas cargadas durante el ensayo	EI [kN-m ²]	Trabajo conjunto de las láminas [%]
1	2 láminas centrales (L ₅ y L ₆)	2.135	91
	4 láminas centrales (L ₄ a L ₇)	2.225	94
	6 láminas centrales (L ₃ a L ₈)	2.217	96
	10 láminas (L ₁ a L ₁₀)	2.274	100
2	2 láminas centrales (L ₅ y L ₆)	2.169	88
	4 láminas centrales (L ₄ a L ₇)	2.289	94
	6 láminas centrales (L ₃ a L ₈)	2.353	96
	10 láminas (L ₁ a L ₁₀)	2.421	100

Nota: No se evidencio separación horizontal de las láminas en los registros del sensor N°8.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Estadística Descriptiva de los Resultados

Los Cuadros N°10 y N°11 registran la estadística descriptiva de deslizamientos registrados en los ensayos de uniones atarugadas bajo cargas de compresión perpendicular y paralela. Se observan coeficientes de variación esperables para un estudio de uniones mecánicas, donde las mayores magnitudes se producen en zonas de carga cercanas a la falla.

Cuadro N°10
Estadística del ensayo de compresión perpendicular

Parámetro	v_i [mm]	v_{mod} [mm]	v_e [mm]	k_i [N/mm]	k_s [N/mm]	$v_{0,6mod}$ [mm]	$v_{0,8mod}$ [mm]
Promedio	1,8	1,1	0,7	1.561	2.614	1,7	2,7
Valor mínimo	1,4	0,6	0,6	999	1.381	1,2	1,8
Valor máximo	2,8	2,0	0,9	2.039	4.442	2,7	4,9
Rango	1,4	1,4	0,3	1.040	3.061	1,6	3,1
Desviación estándar	0,3	0,2	0,1	204	586	0,3	0,7
Coeficiente de variación (%)	15	22	10	13	22	17	26
Tamaño muestra	30	30	30	30	30	30	30

Nota: El LTNP del 5%, con un 75% de nivel de confianza para K_i y K_s es 1.150 N/mm y 1.730 N/mm

Cuadro N°11
Estadística del ensayo de compresión paralela

Parámetro	v_i [mm]	v_{mod} [mm]	v_e [mm]	k_i [N/mm]	k_s [N/mm]	$v_{0,6mod}$ [mm]	$v_{0,8mod}$ [mm]
Promedio	1,1	0,6	0,6	2.540	5.021	0,9	1,6
Valor mínimo	0,9	0,4	0,4	1.391	3.220	0,6	0,9
Valor máximo	2,0	0,9	1,5	3.083	7.250	1,3	5,0
Rango	1,1	0,5	1,1	1.692	4.029	0,7	4,1
Desviación estándar	0,2	0,1	0,2	422	1.140	0,2	0,8
Coeficiente de variación (%)	21	23	36	17	23	23	50
Tamaño muestra	30	30	30	30	30	30	30

Nota: El LTNP del 5% con un 75% de nivel de confianza para K_i y K_s es 1.596 N/mm y 3.346 N/mm

El Cuadro N°12 registra la estadística descriptiva de rigidez y momento flector obtenidos en los ensayos de vigas laminadas atarugadas.

Cuadro N°12
Estadística del ensayo de flexión en laminación vertical

Descripción	Laminación continua		Laminación con empalme	
	EI [kN-m ²]	Momento flector [kN-m]	EI [kN-m ²]	Momento flector [kN-m]
Promedio	1.069	48,9	840	42,2
Valor mínimo	1.028	39,0	774	32,9
Valor máximo	1.162	55,0	894	49,8
Rango	134	16,0	120	17,0
Desviación estándar	56,3	6,0	44,5	7,2
Coefficiente de variación (%)	5	12	5	17
Tamaño muestra	5	5	5	5

Se observa una diferencia en los resultados de rigidez entre las vigas ensayadas con laminación continua y con empalmes, donde estas últimas muestran un rendimiento inferior en todos los parámetros medidos.

Los datos de los ensayos en flexión muestran de manera consistente un bajo coeficiente de variación en todas las tipologías de viga.

Los ensayos a vigas de laminación continua presentan parámetros de resistencia y rigidez superiores con respecto a las vigas de laminación con empalme. En particular, la rigidez medida es un 27% superior, mientras que la resistencia es 16% superior. Se evidencia fallas de la unión con empalme en 1 de 5 vigas ensayadas.

5.2. Deslizamiento de la Unión Atarugada

El módulo de deslizamiento K_i , K_s se determinó considerando el estimador porcentual no paramétrico (EPN) del 5% considerando los 30 resultados obtenidos en los ensayos, en ellos se aprecia valores superiores para los ensayos de compresión paralela en comparación con los de compresión perpendicular.

El Cuadro N°13 registra las relaciones de carga-deslizamiento características unitarias, medidas en K_i , K_s .

Se observa que los parámetros de corrimiento k_i y k_s son superiores al considerar una dirección de los esfuerzos paralelos a la fibra. Esto se contrasta con las metodologías para el cálculo de módulos de corrimiento en la NCh 1198 (INN, 2014) y EN 1995, donde no existe diferenciación respecto de este parámetro referido a distintas orientaciones de fibra, como se evidencia en las ecuaciones citadas en 3.4.2. Además, se destaca que estos valores tienen una

magnitud equivalente al 50% de los registrados directamente del ensayo en los Cuadros N°10 y N°11 para considerar el valor del corrimiento por cada plano de corte en el cizalle.

Se observa, además, que los valores determinados mediante el ensayo de compresión paralela presentan en todos los casos un mejor comportamiento ante las deformaciones en comparación con la compresión perpendicular, donde se registró una mayor deformación por unidad de carga.

Cuadro N°13
Parámetros de corrimiento

Parámetro de corrimiento	Compresión perpendicular [N/mm]	Compresión paralela [N/mm]
k_i	575	789
k_s	865	1.673

El comportamiento de las probetas en los tramos 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 atarugada, lo que se observa en la Figura N°10.

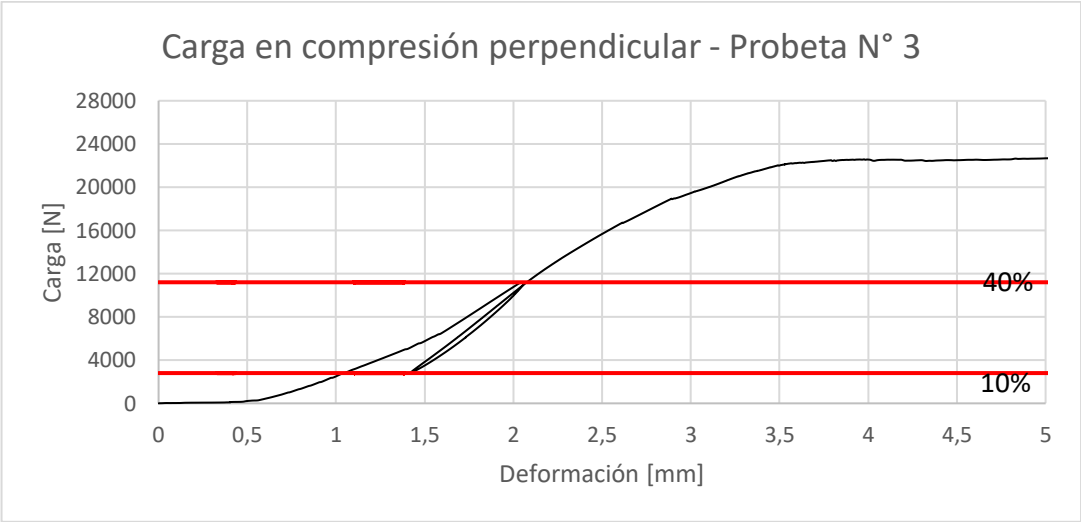


Figura N° 10. Deslizamiento de la unión atarugada en compresión perpendicular

Con la ejecución del ensayo de flexión de 3 puntos es posible establecer que, al aplicar una carga de prueba de 4,4 toneladas, la cual corresponde a la carga necesaria para alcanzar el valor característico de tensión en flexión en la viga atarugada de laminación continua, las láminas laterales de un elemento tipo losa atarugada registran entre el 88% y el 100% de la deformación

asociada a la carga aplicada. Esta distribución se evidencia claramente en las deformaciones medidas durante el ensayo registradas en el Cuadro N°9.

Además, se observa que la rigidez registrada bajo las distintas metodologías de carga puntual aplicada en el centro, presenta diferencias inferiores al 12%.

5.3. Comparación Rigidez de las Vigas Laminadas Atarugadas con Otros Tipos de Envigado

La rigidez de un elemento estructural es la propiedad que permite determinar las deformaciones esperadas para un diseño sometido a una carga conocida. Usualmente en el diseño estructural en madera esta es la principal limitante.

El Cuadro N°14 registra los valores de rigidez obtenidos a partir de los ensayos de vigas atarugadas y los disponibles en fichas técnicas y normas de cálculo de elementos estructurales que se encuentran en el mercado.

El momento y tensión en flexión admisible se determinaron en primera instancia con un Límite de Tolerancia Paramétrico (LTP) del 5% con un nivel de confianza del 75% a partir de la carga máxima registrada, dividida por un factor de seguridad de 2,1; de acuerdo a las indicaciones de la NCh3028-2 (INN, 2017b) para madera aserrada estructural. Sin embargo, dada la discreta cantidad de ensayos, se prefiere una metodología más conservadora, donde se considera como valor admisible el mínimo resultado con un factor de seguridad de 3.

En términos de rigidez, la laminación continua supera en un 7% las propiedades del grado G1 que se registran en la NCh 1198 (INN, 2014), para una escuadría equivalente de 205x180mm, cuyo valor es de 996 kN-m². Por su parte la laminación con empalmes alcanza un 88% de dicho valor.

De acuerdo a las ecuaciones indicadas en la sección 3.5 de este documento, la capacidad de momento en flexión esperada para un elemento sólido de iguales dimensiones a la viga laminada atarugada, se obtiene a partir de la capacidad estructural de la madera utilizada, en este caso F_f está dado para el grado G1 como 7,5 MPa. De lo anterior se tiene que la capacidad medida en la viga atarugada de laminación continua y con empalmes es respectivamente 16,3 MPa y 11,6 MPa, mientras que la capacidad de un elemento sólido es de 8,3 MPa.

Cuadro N°14
Rigidez de los distintos tipos de envigado

Tipo de viga	Rigidez (EI) (kN-m ²)	Momento admisible (kN-m)	Tensión F_f (MPa)
Laminada atarugada sin empalme	1.069	16,3	11
Laminada atarugada con empalme	840	11,6	9,9
Laminada clavada	1.025	15,6	14,2
Laminada clavada con empalme	827	9,4	8,3
Pino radiata G1 90x185	475	3,9	7,5
Pino radiata G1 205x180	996	8,3	7,5

El Cuadro N°15 registra las longitudes máximas de viga laminada atarugada en condiciones de servicio, obtenidas a partir de las propiedades mecánicas registradas en el Cuadro N°13, además se ofrece una comparación con algunos elementos estructurales disponibles en el comercio.

Cuadro N°15
Luz máxima alcanzable, por tipo de viga laminada atarugada y espaciamiento

Viga laminada atarugada , 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)
Laminada atarugada sin empalme	6,0	5,4	4,8	6,1	5,5	4,8
Laminada atarugada con empalme	5,5	5,0	4,4	5,6	5,1	4,4
Laminada clavada	5,9	5,4	4,7	6,0	5,4	4,8
Laminada clavada con empalme	5,5	5,0	4,4	5,6	5,1	4,4
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

Cabe destacar que el cuadro anterior solo considera factores de reducción por contenido de humedad y duración de carga de acuerdo a la NCh 1198.

6. CONCLUSIONES

Las relaciones de carga deslizamiento K_s medidas en los ensayos de compresión paralela fueron superiores a las medidas en los ensayos de compresión perpendicular, evidenciando la necesidad de diferenciar la determinación del corrimiento en función del ángulo entre el esfuerzo y la fibra de la madera.

Los elementos estructurales del tipo viga atarugada con laminación continua presentan un mejor rendimiento en rigidez y capacidad en flexión, en comparación a los elementos laminados con empalmes. Esto es esperable dado que aun con el correcto funcionamiento de la unión empalmada, esta representa una discontinuidad del material equivalente a un defecto estructural, sin embargo, dicho defecto es susceptible de variar en función de la metodología de fabricación del laminado.

El límite de proporcionalidad se presenta de manera consistente en el tramo entre el 10% y el 40% de la carga esperada para el medio de unión de acuerdo a lo señalado por la EN 26891,

por lo que el parámetro K_s es un buen predictor del comportamiento del medio de unión bajo cargas admisibles.

La capacidad del laminado atarugado con laminación continua y con empalmes, presenta propiedades de rigidez y resistencia en flexión superiores en comparación con las que registra un elemento de iguales dimensiones en madera sólida, considerando el mismo grado estructural de los componentes. Lo anterior, a pesar de utilizar un factor de seguridad de 3 sobre el menor valor obtenido durante los ensayos, lo que es un análisis más conservador en comparación al factor de seguridad 2,1 que se utiliza usualmente para la MAE. Sin embargo, se requiere una mayor cantidad de ensayos para obtener un nivel de confianza estadístico significativo en el análisis de los datos.

La metodología de fabricación y el diseño empleado para la losa atarugada fueron capaces de entregar una superficie que se comporta de manera consistente ante los esfuerzos de carga concentrada, donde se evidencio una rigidez similar para los distintos modos de carga aplicados y además un comportamiento individual de las láminas que se condice con el correcto traspaso de cargas mediante los tarugos.

7. REFERENCIAS

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 (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 (2016). EN, 2016. UNE-EN 14358. Estructuras de madera. Determinación y verificación de los valores característicos. Normalización Española. En: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0057445>

INN (2017^a). NCh 3028/1:2017. Madera estructural - Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia - Parte 1: Métodos de ensayo en tamaño estructural. Instituto Nacional de Normalización, Chile. En: <https://ecommerce.inn.cl/nch30281201760204>

INN (2017^b). 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>

INN (2014). NCh 1198: Madera. Construcciones en madera. Cálculo. Instituto Nacional de Normalización, Chile.

8. ANEXO - FOTOGRAFÍAS Y CURVAS DE CARGA DEFORMACIÓN

En las probetas de los ensayos de compresión perpendicular y paralela se presentaron en todos los casos fallas por cizalle doble de la unión atarugada, 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°11 y N°12 muestran los tipos de fallas encontradas de los ensayos ejecutados en uniones atarugadas.

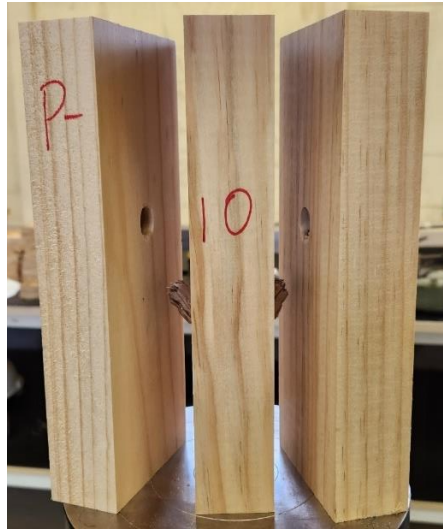


Figura N° 11
Falla típica en compresión paralela



Figura N° 12
Falla típica en compresión perpendicular

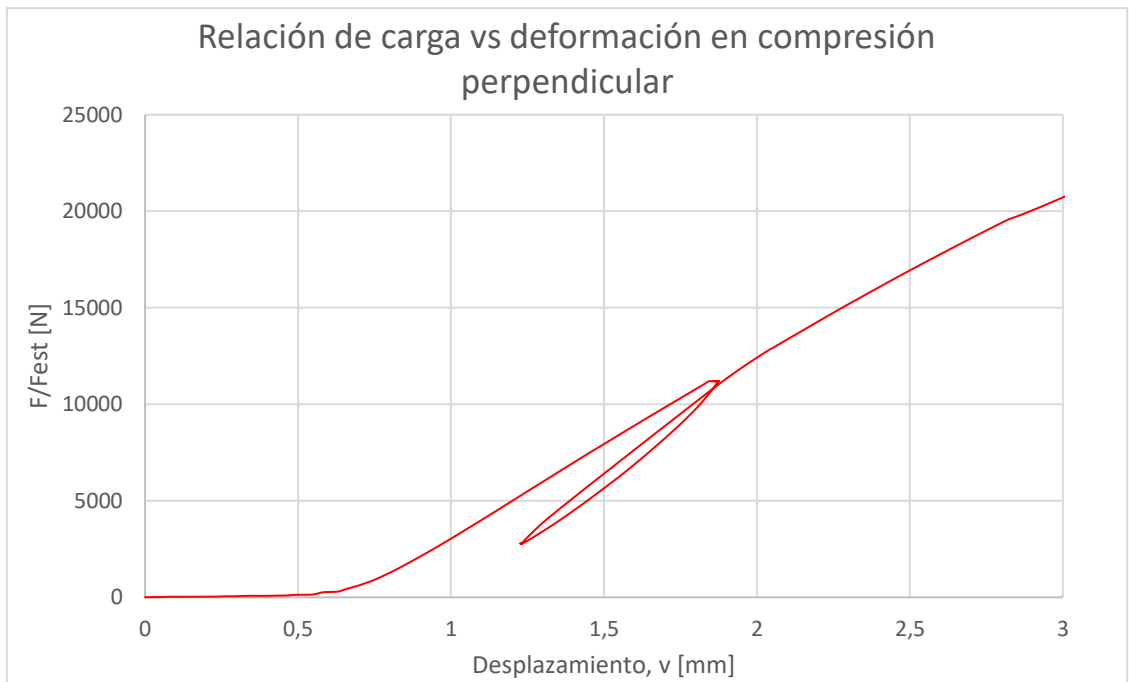


Figura N° 13
Gráfico de carga vs deformación compresión perpendicular

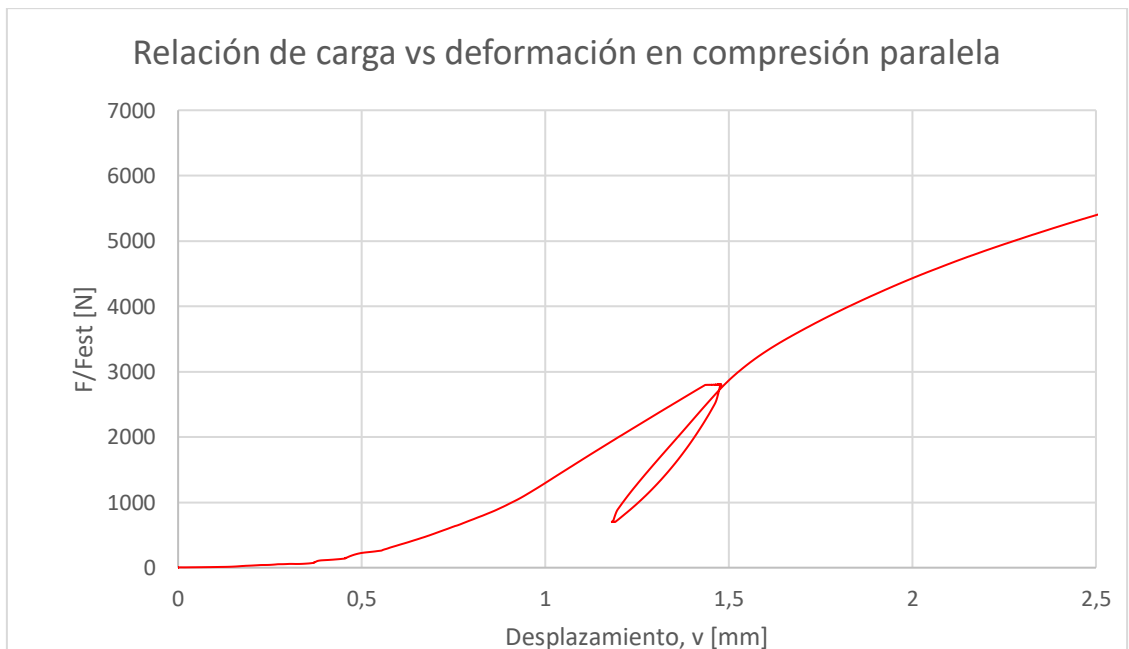


Figura N° 14
Gráfico de carga vs deformación compresión paralela

En los ensayos de flexión la falla ocurrió entre en el tercio central del elemento laminado atarugado, en particular en las probetas que presentaron uniones del tipo empalme, estas se encontraron en algunos casos en el punto de desarrolló la falla. Las Figuras N°15 a N°18 muestran las fallas encontradas de los ensayos flexión para elementos laminados atarugados continuos y con empalmes.



Figura N° 15
Falla típica en flexión laminación continua

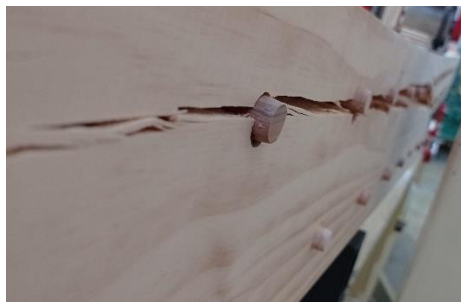


Figura N° 16
Falla típica en flexión laminación continua

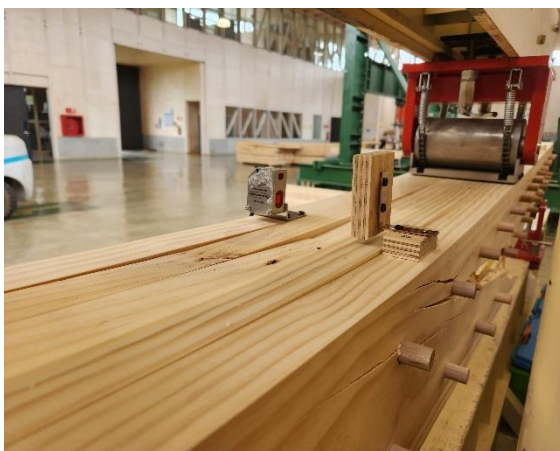


Figura N° 17
Falla típica en flexión laminación con empalme



Figura N° 18
Falla típica en flexión laminación con empalme

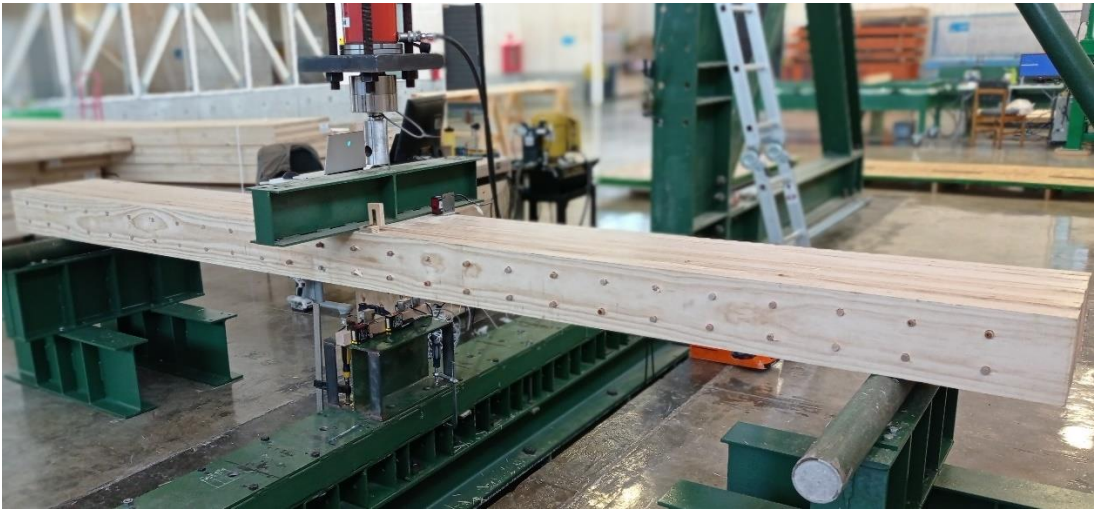


Figura N° 19
Ensayo de losa atarugada 10 laminas

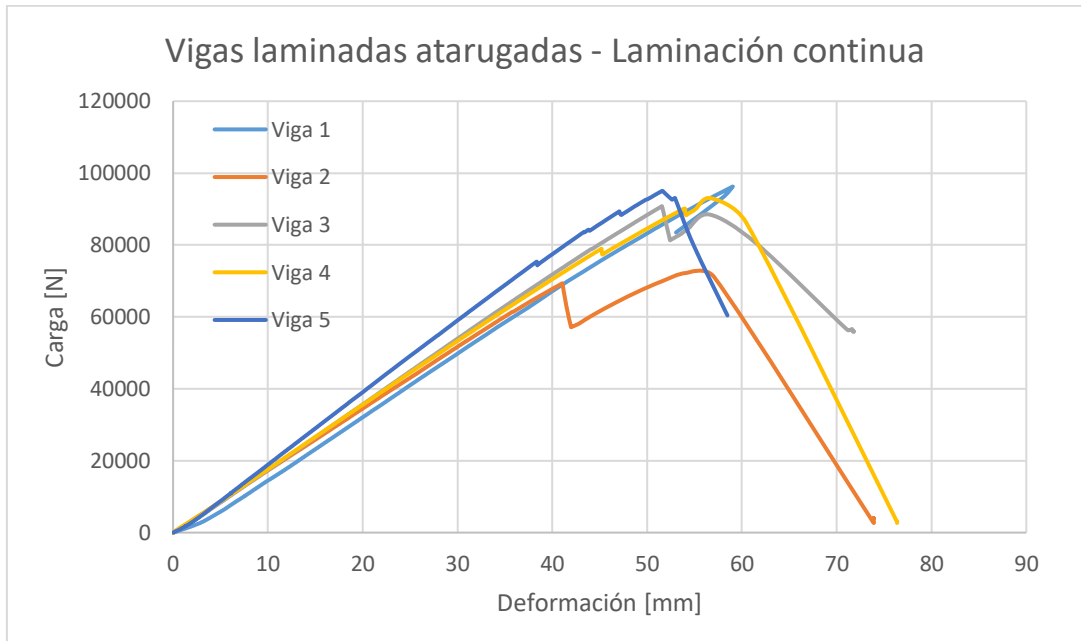


Figura N° 20
Gráfico de carga vs deformación ensayo de flexión viga laminada atarugada continua

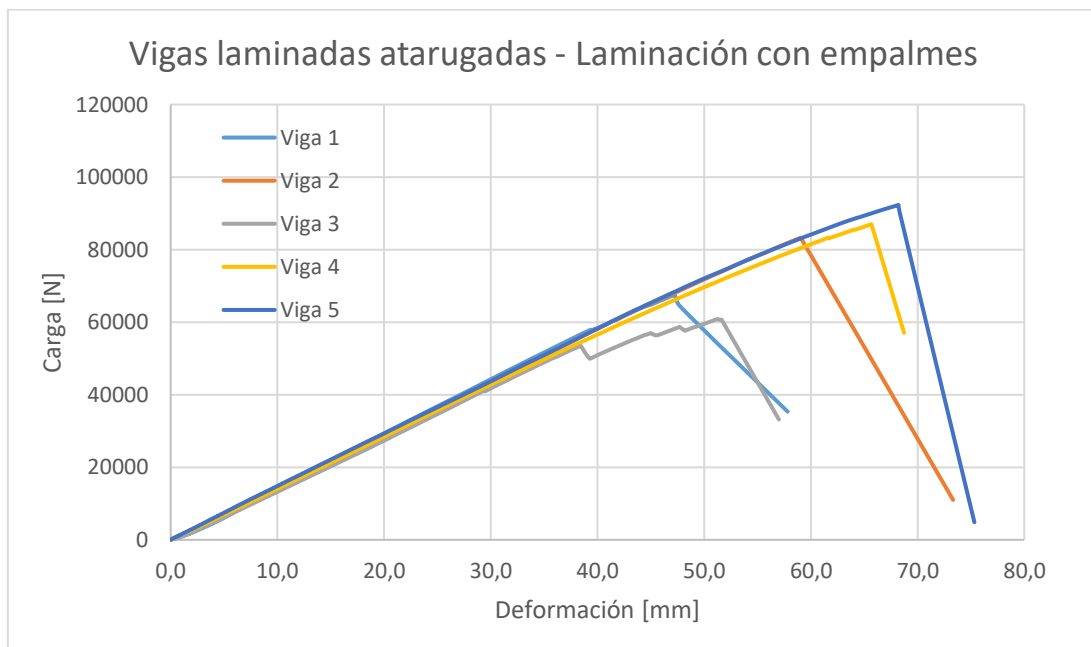


Figura N° 21
Gráfico de carga vs deformación ensayo de flexión viga laminada atarugada con empalmes



www.infor.cl