

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ELEMENTO ESTRUCTURAL VIGA LAMINADA FABRICADA CON MADERA ASERRADA DE PINO OREGON



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 ELEMENTO ESTRUCTURAL VIGA LAMINADA FABRICADA CON MADERA ASERRADA DE PINO OREGON

Cristian Reyes¹; Luis Vásquez; Pablo Mardones y Raúl Campos

**INSTITUTO FORESTAL
2021**

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



INFOR

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

ISBN N° 978 956 318 221 - 7
Registro Propiedad Intelectual N° 2022 A 1826

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, 2021. Caracterización Mecánica del Elemento Estructural Viga Laminada Fabricada con Madera Aserrada de Pino Oregon. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 244. P. 23.

PRÓLOGO

La construcción en altura con productos en base a madera se ha transformado en una tendencia a nivel mundial. Para abordar este desafío se utiliza una serie de productos de ingeniería, entre los cuales destacan las maderas contralaminadas y las vigas laminadas. Esta última se define como un producto fabricado con madera aserrada estructural (MAE), conformada por capas de madera unidas con adhesivos estructurales, duraderos y resistentes a la humedad.

El año 2021 la industria nacional de madera laminada está conformada por 14 empresas, entrega empleo a 537 personas, y cuenta con una capacidad instalada/turno de 44.405 m³/año (INFOR. 2021).

La norma chilena que permite el diseño de los elementos laminados es la NCh 2165, que data del año 1991 (INN, 1991). En la actualidad, ella está siendo sometida a una actualización por parte de un Comité Técnico adscrito al Instituto Nacional de Normalización (INN), tomando en consideración antecedentes de la norma europea EN 14080 (UNE, 2017).

Este estudio permite determinar las capacidades mecánicas de las uniones dentadas fabricadas con con madera aserrada estructural MAE de pino oregon, grados visuales (G2, G1) y mecánicos (C16, C24), que contribuye a la caracterización del elemento viga laminada según norma europea (EN 14080).

El presente trabajo fue financiado con recursos provistos por convenio entre el Ministerio de Agricultura (MINAGRI) y el Instituto Forestal (INFOR).

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO	1
3. MATERIALES Y MÉTODO	1
4. RESULTADOS	8
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	14
6. CONCLUSIONES	20
7. REFERENCIAS	20
8. ANEXO FOTOGRAFÍAS	21

1. INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de construir y diseñar entornos amplios, con luces de gran envergadura que se adapten a las diversas actividades humanas, la madera laminada constituye una solución confiable basada en la ingeniería y en un proceso de fabricación industrializado.

La viga laminada es un elemento estructural que se fabrica principalmente con madera aserrada estructural de escuadría comercial. Estas vigas pueden alcanzar grandes dimensiones mediante la utilización de uniones dentadas que le otorgan continuidad longitudinal a la madera aserrada, dispuestas en múltiples capas unidas con adhesivos estructurales, duraderos y resistentes a la humedad, configuración que le permite trabajar de manera conjunta en la sección transversal y proporcionar mayores prestaciones.

Típicamente, una viga laminada está conformada por laminas exteriores e interiores, las cuales de acuerdo al diseño de la viga le otorgan una resistencia específica.

Cada una de las piezas de madera aserrada que componen el elemento laminado se deben unir de manera adecuada para asegurar la correcta transmisión de cargas, siendo la ejecución de la unión dentada la parte fundamental para llevar a cabo esta tarea.

Como consecuencia de lo anterior, es fundamental ejecutar ensayos de caracterización mecánica de la madera aserrada estructural que considera uniones dentadas.

El presente estudio contiene los resultados de la caracterización mecánica de las uniones dentadas fabricadas con madera aserrada estructural (MAE) de pino oregon, grados visuales (G1, G2) y mecánicos (C16, C24), que contribuye a la caracterización del elemento estructural viga laminada según norma europea EN 14080.

2. OBJETIVO

Evaluar las propiedades mecánicas del elemento estructural viga laminada a partir de la caracterización de las propiedades mecánicas de la MAE y sus uniones dentadas, aplicando la metodología establecida por la norma europea EN 14080.

3. MATERIALES Y MÉTODO

El estudio se desarrolló en 2 etapas. La primera de ellas consideró la medición de las dimensiones, contenido de humedad, densidad aparente y módulos de elasticidad en flexión (canto, abatida) y tracción de la MAE sin uniones dentadas.

La segunda etapa contempló la preparación, fabricación y ensayos mecánicos de las probetas de MAE con uniones dentadas.

3.1. Material Experimental

Se utilizó madera aserrada estructural (MAE) de pino oregon al 12% (± 3) de contenido de humedad, escuadría 41x90 mm, cepillada y con clasificación estructural visual (G1, G2) y mecánica (C16, C24).

En la fabricación de las probetas de MAE con unión dentada se utilizó una geometría de diente, tipo de adhesivo y presiones de prensado que son habituales para la laminadora que las confeccionó.

La Figura N°1 señala el tipo de diente utilizado, que consideró un largo (l_j) 14mm, paso (p) 3mm, ángulo (α) 4°, ancho de punta (b_j) 1mm y holgura de punta (l_i) 0,6mm.

En la fabricación de las uniones dentadas se consideraron algunos de los requisitos que se señalan el Anexo I de la norma europea EN14080, tales como el acondicionado de la madera, la preparación y almacenamiento del adhesivo, las condiciones de curado y la distancia mínima de los nudos con la unión dentada (Figura N°2).

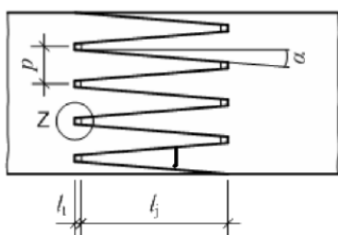


Figura N°1
ESQUEMA DE LA UNIÓN DENTADA

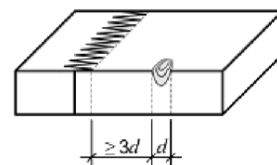
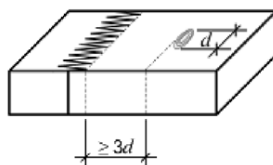


Figura N°2
DISTANCIA DE NUDOS CON UNIÓN DENTADA

3.2. Diseño Experimental

En el Cuadro N°1 se señala el diseño experimental de la Etapa 1, que considera la determinación de los módulos de elasticidad en flexión (canto, abatido) y en tracción de la MAE sin unión dentada.

Cuadro N°1
MÓDULO DE ELASTICIDAD MEDIO DE LA MAE

Variable	Cantidad
Grado estructural de la madera	4 (G2, G1, C16, C24)
Escuadría	1 (41x90mm)
Ensayos	3 (Flexión de canto, Flexión abatida, Tracción)
Repeticiones	30
Total de ensayos	360

En el Cuadro N°2 se señala el diseño experimental de la Etapa 2, que considera la determinación de las resistencias en flexión y tracción de las probetas MAE con unión dentada.

**Cuadro N°2
TENSIONES CARACTERÍSTICAS DE MAE CON UNIÓN DENTADA**

Variable	Cantidad
Grado estructural de la madera	4 (G2, G1, C16, C24)
Escuadría	1 (41x90mm)
Tipo de unión	1
Tipo de adhesivo	1 (Resina Prefere 4535- Catalizador Prefere 5035)
Ensayos	2 (Flexión, tracción)
Repeticiones	50
Total de ensayos	400

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 Bio Bio de INFOR en Concepción.

3.3.1. Módulo de Elasticidad en Flexión de Canto y Abatida

El ensayo de flexión de cuatro puntos fue ejecutado según indicaciones de la norma EN 408 (UNE, 2012), que permite determinar los parámetros de módulo de elasticidad en piezas dispuestas de cara y canto, mediante la aplicación de una carga no destructiva.

Las Figuras N°3 y N°4 registran los esquemas del ensayo y su implementación en el laboratorio, respectivamente.

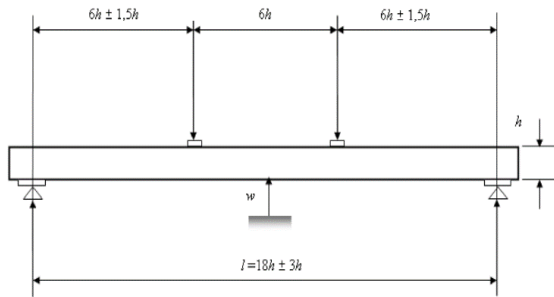


Figura N°3
ESQUEMA DEL ENSAYO EN FLEXIÓN

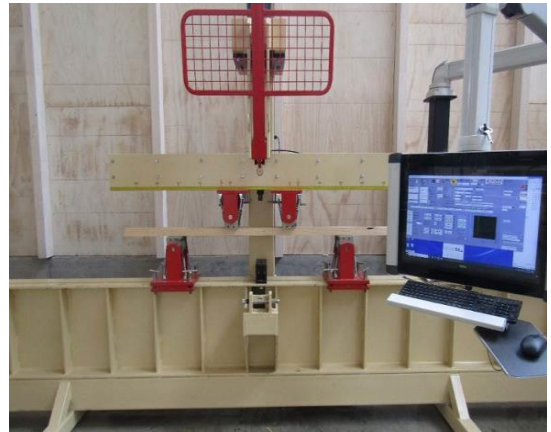


Figura N°4
IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO EN FLEXIÓN

3.3.2. Módulo de Elasticidad en Tracción

El ensayo de tracción fue ejecutado según indicaciones de la norma NCh 3028-1 (INN, 2017a). Adicional a la carga se midió la deformación producida por la solicitación.

De la ley de Hooke para la deformación unitaria longitudinal se tiene que el módulo de elasticidad en tracción se determina como se indica:

$$E_{tracción} = \frac{P * L_0}{\delta * A}$$

Donde:

$\frac{P}{\delta}$ Pendiente de la recta proyectada en la zona elástica del grafico Fuerza- Desplazamiento.

L_0 Distancia inicial entre puntos de medición del desplazamiento.

A Área de la sección transversal de la probeta.

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

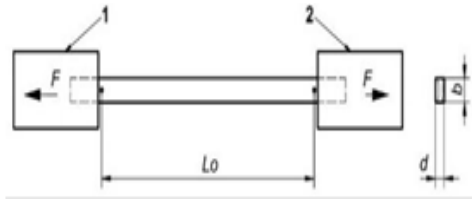


Figura N°5
ESQUEMA DEL ENSAYO EN TRACCIÓN



Figura N°6
IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO MOE LONGITUDINAL EN TRACCIÓN

3.3.3. Resistencia en Flexión

El ensayo de flexión de cuatro puntos fue ejecutado según indicaciones de la norma EN 408, y permite determinar la resistencia en flexión abatida de las uniones dentadas.

Las Figuras N°7 y N°8 registran los esquemas del ensayo y su implementación en el laboratorio, respectivamente.

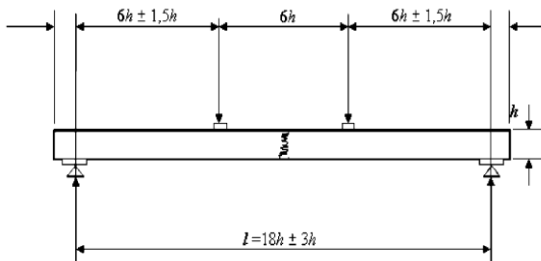


Figura N°7
ESQUEMA DEL ENSAYO EN FLEXIÓN

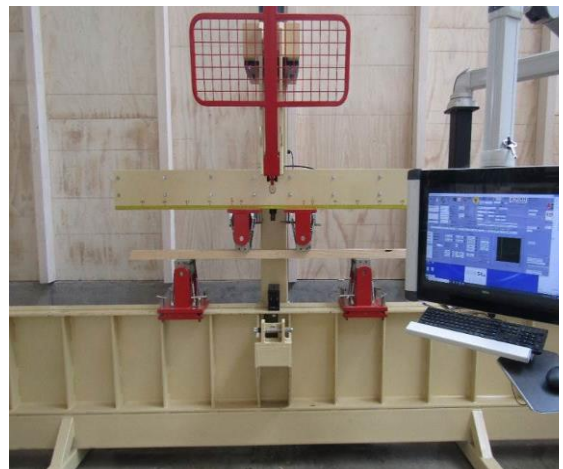


Figura N°8
IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO EN FLEXIÓN

3.3.4. Resistencia en Tracción

El ensayo de resistencia a tracción fue ejecutado según indicaciones de la norma EN 408, y permite determinar la resistencia máxima al esfuerzo de tracción en piezas con unión dentada ubicada entre las mordazas.

Las Figuras N°9 y N°10 registran el esquema del ensayo y su implementación en el laboratorio, respectivamente.

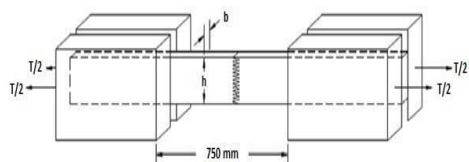


Figura N°9
ESQUEMA DEL ENSAYO EN TRACCIÓN

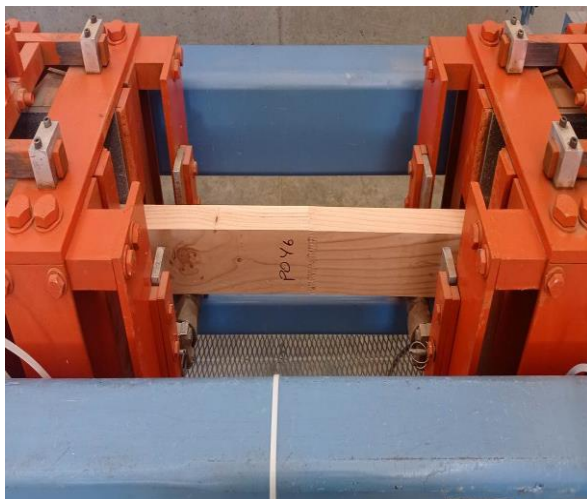


Figura N°10
IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO TRACCIÓN

3.4. Resistencia Mecánica del Elemento Estructural Viga Laminada

3.4.1 Método 1

El primer método propuesto por la norma europea EN14080 para determinar la resistencia característica en flexión del elemento estructural viga laminada, demanda conocer la clase de resistencia T de la MAE sin unión dentada (Cuadro N°3) y la razón entre las resistencias características en flexión y tracción de las probetas de MAE con unión dentada, previamente definida como 1,4.

Posteriormente se debe asignar la clase resistente de madera laminada homogénea o compuesta.

Cuadro N° 3
CLASES DE RESISTENCIA T PARA LA MAE SEGÚN EN14080

Clase de resistencia T	Tensión característica de la MAE en tracción paralela [MPa]	Módulo de elasticidad medio de la MAE en tracción paralela [MPa]	Densidad característica de la MAE [Kg/m³]
T8 (C14)	8	7000	290
T9	9	7500	300
T10 (C16)	10	8000	310
T11(C18)	11	9000	320
T12(C20)	12	9500	330
T13(C22)	13	10000	340
T14(C24)	14	11000	350

Para asignar la clase de resistencia del elemento estructural viga laminada, este método requiere conocer la clase de resistencia T de la MAE sin unión dentada y la resistencia en flexión de la MAE con unión dentada (Cuadro N°4).

Cuadro N° 4
CLASES DE RESISTENCIA DE LA MADERA LAMINADA

Clase de resistencia de la madera laminada homogénea	Clase resistente T de la MAE	Tensión en flexión de la MAE con unión dentada [MPa]
GL20h	T10	25
GL20h	T11	22
GL22h	T13	25
GL24h	T14	30

La norma europea EN14080 asigna a las clases de resistencia del elemento estructural viga laminada GL20h, GL22h y GL24h, la tensión de flexión característica de 20, 22 y 24 [MPa] respectivamente.

Notar que el valor requerido de la tensión característica en flexión de la MAE con unión dentada es mayor a la tensión característica en flexión asignada al elemento estructural viga laminada.

3.4.1 Método 2

El segundo método, propuesto por la norma europea EN14080 para determinar la resistencia en flexión característica del elemento estructural viga laminada, considera su cálculo a partir de las propiedades mecánicas de la MAE sin unión dentada y los valores característicos de las resistencias a la flexión y tracción de las probetas de MAE con unión dentada.

La norma EN14080 señala la ecuación siguiente para calcular la tensión característica en flexión del elemento estructural viga laminada:

$$f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 \left(\frac{f_{m,j,k}}{1,4} - f_{t,0,l,k} + 6 \right)^{0,65}$$

Donde:

$f_{t,0,l,k}$ Tensión característica a la tracción paralela a la fibra MAE sin unión dentada.

$f_{m,j,k}$ Tensión característica a la flexión MAE con unión dentada.

La ecuación indicada tiene validez si se cumple la siguiente condición:

$$1,4 * f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1,4 * f_{t,0,l,k} + 12$$

4. RESULTADOS

4.1. Ensayos del Material Experimental

Los Cuadros N°5 al N°7 registran los resultados de los ensayos mecánicos no destructivos para determinar los MOE en flexión abatida, de canto, y tracción de la MAE sin unión dentada.

Los Cuadros N°8 y N°9 registran los resultados de los ensayos mecánicos de flexión y tracción de la MAE con unión dentada.

Cuadro N° 5
MÓDULO DE ELASTICIDAD, FLEXIÓN DE CANTO

N° Pieza	MOE Canto [MPa]			
	C16	C24	G1	G2
P001	6.492	8.486	8.418	7.464
P002	10.176	11.271	11.603	8.088
P003	8.222	11.488	8.117	5.521
P004	9.165	9.112	8.734	9.320
P005	9.455	12.603	10.331	7.456
P006	7.680	8.531	11.898	10.761
P007	9.089	10.065	8.902	7.282
P008	9.085	10.191	10.441	8.393
P009	7.972	10.886	9.492	10.100
P010	10.905	9.408	9.325	7.340
P011	8.212	12.958	7.985	7.878
P012	8.925	11.279	9.759	10.228
P013	11.166	10.210	8.404	7.272
P014	10.740	9.585	7.920	8.430
P015	10.010	11.613	9.640	11.239
P016	9.158	12.886	8.808	8.824
P017	10.164	11.528	10.336	6.677
P018	7.706	10.109	11.245	11.640
P019	8.428	9.948	9.316	5.823
P020	9.513	10.323	8.218	7.628
P021	9.244	10.765	10.801	7.201
P022	9.083	12.259	8.024	7.793
P023	6.274	11.824	14.176	10.171
P024	8.861	11.989	8.613	6.540
P025	9.524	8.959	8.000	6.115
P026	10.917	10.834	8.072	8.741
P027	10.702	10.903	7.963	8.596
P028	8.608	11.366	6.741	8.162
P029	8.311	9.665	10.758	8.589
P030	9.789	10.214	11.075	6.833

Cuadro N° 6
MÓDULO DE ELASTICIDAD, FLEXIÓN ABATIDA

N° Pieza	MOE Abatido [MPa]			
	C16	C24	G1	G2
P001	6.847	8.886	8.529	7.243
P002	12.033	11.672	12.105	7.854
P003	8.721	11.621	9.476	5.883
P004	10.455	8.561	8.466	9.424
P005	10.123	12.723	11.884	7.414
P006	7.372	8.357	13.250	12.304
P007	9.844	10.643	9.134	7.271
P008	10.454	10.687	10.328	8.278
P009	8.320	11.260	10.085	10.262
P010	11.948	9.912	9.642	7.648
P011	8.518	11.161	8.099	8.569
P012	9.008	11.527	9.645	10.103
P013	11.856	10.742	8.555	7.149
P014	10.573	10.103	8.572	9.383
P015	10.574	11.954	10.177	11.311
P016	9.750	13.390	10.480	9.926
P017	10.579	11.731	11.465	7.432
P018	7.552	9.888	12.617	12.534
P019	8.753	10.229	9.734	6.172
P020	10.033	10.761	8.302	7.357
P021	10.331	11.331	11.451	7.263
P022	9.072	11.962	8.609	8.291
P023	6.624	12.111	14.635	10.731
P024	9.435	12.252	9.605	7.438
P025	9.514	8.790	7.677	7.190
P026	12.073	11.206	9.053	8.114
P027	9.853	11.397	8.164	9.792
P028	8.865	11.888	6.950	7.769
P029	8.703	10.112	10.991	8.260
P030	9.972	10.862	10.332	7.318

Cuadro N° 7
MÓDULO DE ELASTICIDAD, TRACCIÓN

N° Pieza	MOE Tracción [MPa]			
	C16	C24	G1	G2
P001	5.286	8.871	8.354	7.734
P002	9.461	9.917	10.171	8.459
P003	6.882	9.858	8.488	4.737
P004	7.875	9.576	8.769	10.029
P005	8.926	10.838	10.945	7.161
P006	6.874	8.690	11.623	10.550
P007	9.226	10.175	7.028	6.679
P008	7.581	8.316	8.947	6.938
P009	6.913	9.170	9.785	8.521
P010	9.370	9.908	8.095	6.426
P011	7.924	10.258	7.444	8.490
P012	8.310	8.761	8.832	9.915
P013	9.263	9.483	8.685	6.556
P014	9.176	9.393	7.415	8.911
P015	9.528	10.410	9.796	10.281
P016	9.005	11.076	9.836	7.575
P017	7.734	9.604	8.615	6.111
P018	7.805	8.910	12.071	10.892
P019	6.817	9.748	7.629	4.867
P020	7.085	9.193	7.308	7.512
P021	8.978	7.848	9.448	7.885
P022	8.624	10.146	7.284	6.806
P023	6.365	10.962	13.274	8.896
P024	8.506	10.287	9.228	6.806
P025	7.985	7.947	9.195	6.239
P026	10.310	8.404	8.443	7.587
P027	8.662	9.441	7.626	8.261
P028	8.404	10.251	6.322	6.805
P029	7.788	7.826	10.179	8.168
P030	9.755	10.094	9.593	6.977

Cuadro N° 8
RESISTENCIA EN FLEXIÓN, MAE CON UNIÓN DENTADA

Resistencia en tracción [MPa]					Resistencia en tracción [MPa]				
N° Pieza	C16	C24	G1	G2	N° Pieza	C16	C24	G1	G2
P001	45,8	62,7	32,6	40,6	P027	27,1	39,4	44,6	35,0
P002	53,2	40,5	50,6	40,1	P028	43,8	49,9	79,7	34,4
P003	50,8	54,1	35,4	39,5	P029	50,5	57,9	32,5	49,5
P004	30,2	63,2	47,5	40,4	P030	42,2	33,7	52,4	39,4
P005	54,5	66,3	48,3	56,6	P031	36,3	50,8	37,4	38,6
P006	45,8	46,2	49,3	47,7	P032	44,1	63,2	40,8	23,2
P007	54,6	60,8	42,1	56,5	P033	24,4	49,8	44,4	45,8
P008	46,9	52,9	54,5	36,5	P034	48,7	48,9	42,9	32,8
P009	51,5	48,2	46,4	38,4	P035	29,0	52,2	48,5	39,6
P010	36,4	42,5	41,2	47,0	P036	42,0	52,1	36,7	35,5
P011	44,1	50,1	36,1	39,4	P037	28,5	67,5	48,5	22,3
P012	40,6	71,0	51,5	38,3	P038	37,1	66,4	59,4	44,9
P013	41,5	47,2	43,4	38,9	P039	52,1	66,3	55,5	36,1
P014	44,2	62,9	48,2	40,3	P040	36,7	67,7	38,6	43,5
P015	48,7	47,3	36,4	35,5	P041	43,1	61,7	63,7	46,2
P016	54,8	60,5	50,8	40,0	P042	55,8	49,8	31,8	41,7
P017	28,8	64,2	48,6	37,1	P043	43,3	54,0	47,6	45,4
P018	39,6	49,5	35,4	36,7	P044	36,5	63,2	58,4	45,7
P019	41,9	61,7	39,1	37,2	P045	48,9	60,9	41,3	29,9
P020	43,4	48,3	42,0	52,8	P046	48,3	69,7	45,5	40,2
P021	34,4	56,6	47,8	52,4	P047	47,0	49,1	46,9	43,6
P022	56,5	59,3	45,3	40,8	P048	37,2	56,6	57,7	40,2
P023	44,3	51,3	40,1	43,7	P049	37,6	60,1	41,4	33,2
P024	56,8	53,5	42,3	39,8	P050	36,9	58,1	39,1	45,9
P025	48,6	54,2	30,2	34,7	P051	45,5	56,1	56,0	33,5
P026	37,7	58,2	47,9	36,6	P052	48,2	47,1	-	-

Cuadro N° 9
RESISTENCIA EN TRACCIÓN, MAE CON UNIÓN DENTADA

Resistencia en tracción [MPa]				
N° Pieza	C16	C24	G1	G2
P001	27,6	32,1	28,1	12,4
P002	25,0	32,7	30,7	23,3
P003	33,5	44,8	12,3	33,0
P004	23,0	29,7	25,9	9,8
P005	23,8	41,3	25,0	23,6
P006	29,0	30,8	20,9	11,5
P007	23,6	35,2	23,5	21,2
P008	19,6	26,8	30,8	15,3
P009	23,0	36,7	21,3	28,5
P010	27,8	30,5	22,7	16,1
P011	23,6	26,3	19,2	31,3
P012	31,7	39,3	29,1	24,3
P013	33,3	33,0	23,2	28,2
P014	23,6	31,3	17,0	24,7
P015	11,5	26,7	29,0	24,2
P016	19,8	42,0	21,5	23,7
P017	28,8	33,7	25,4	14,3
P018	35,0	33,4	25,0	20,0
P019	19,5	32,3	25,0	20,4
P020	29,8	34,5	23,8	26,7
P021	11,9	38,2	26,2	26,5
P022	23,5	31,6	16,5	23,7
P023	39,6	28,0	17,3	32,2
P024	22,5	28,3	14,8	21,6
P025	18,7	31,9	24,2	14,3
P026	31,6	35,1	18,7	15,8

Resistencia en tracción [MPa]				
N° Pieza	C16	C24	G1	G2
P027	22,6	34,7	25,5	27,2
P028	22,5	21,2	31,2	19,3
P029	23,9	39,2	29,2	19,4
P030	22,5	39,4	15,0	21,7
P031	26,1	22,2	21,6	29,3
P032	24,9	28,9	31,6	22,5
P033	19,6	30,7	31,2	28,6
P034	22,6	26,7	17,0	26,5
P035	32,8	38,0	24,8	17,7
P036	20,2	30,1	23,2	20,7
P037	26,1	32,4	22,2	15,4
P038	21,5	30,8	19,5	17,5
P039	37,4	32,1	26,0	15,6
P040	31,2	31,7	23,7	20,4
P041	17,4	33,5	29,2	23,0
P042	12,6	38,8	29,0	19,3
P043	16,1	37,4	23,5	25,8
P044	12,1	38,3	27,4	8,1
P045	33,3	24,7	29,6	27,0
P046	14,0	27,5	30,3	13,3
P047	29,7	34,1	28,4	11,4
P048	13,0	32,6	25,6	12,1
P049	20,1	31,8	21,7	26,1
P050	15,5	32,9	14,7	42,0
P051	33,1	34,0	17,7	15,2
P052	17,1	33,6	-	-

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Estadística Descriptiva de los Resultados

Los Cuadros N°8 al N°10 registran la estadística descriptiva de los módulos de elasticidad en flexión abatida, de canto, y tracción paralela de la MAE sin unión dentada.

Cuadro N°8
ESTADÍSTICA DEL MOE EN FLEXIÓN ABATIDA, MAE SIN UNIÓN DENTADA

Descripción	MOE ABATIDO			
	G2	G1	C16	C24
Promedio [MPa]	8.523	9.934	9.592	10.924
Valor mínimo [MPa]	5.883	6.950	6.624	8.357
Valor máximo [MPa]	12.534	14.635	12.073	13.390
Rango [MPa]	6.651	7.685	5.450	5.033
Desviación estándar [MPa]	1.708	1.791	1.464	1.243
Coefficiente de variación (%)	20	18	15	11
Tamaño muestra	30	30	30	30

Cuadro N°9
ESTADÍSTICA DEL MOE EN FLEXIÓN DE CANTO, MAE SIN UNIÓN DENTADA

Descripción	MOE CANTO			
	G2	G1	C16	C24
Promedio [MPa]	8.203	9.437	9.119	10.709
Valor mínimo [MPa]	5.521	6.741	6.274	8.486
Valor máximo [MPa]	11.640	14.176	11.166	12.958
Rango [MPa]	6.119	7.435	4.892	4.472
Desviación estándar [MPa]	1.569	1.578	1.235	1.243
Coefficiente de variación (%)	19	17	14	12
Tamaño muestra	30	30	30	30

Cuadro N°10
ESTADÍSTICA DEL MOE EN TRACCIÓN, MAE SIN UNIÓN DENTADA

Descripción	MOE TRACCIÓN			
	G2	G1	C16	C24
Promedio [MPa]	7.759	9.014	8.214	9.512
Valor mínimo [MPa]	4.737	6.322	5.286	7.826
Valor máximo [MPa]	10.892	13.274	10.310	11.076
Rango [MPa]	6.155	6.951	5.024	3.250
Desviación estándar [MPa]	1.599	1.606	1.151	866
Coefficiente de variación (%)	21	18	14	9
Tamaño muestra	30	30	30	30

Los Cuadros N°11 y N°12 registran la estadística descriptiva de las resistencias de las probetas de MAE con unión dentada ensayada a la flexión y tracción. Los valores característicos fueron determinados con los métodos no paramétrico de la norma nacional NCh3028-2 (INN, 2017b) y europea EN14358 (UNE, 2016).

Cuadro N°11
ESTADÍSTICA DE LA RESISTENCIA FLEXIÓN, MAE CON UNIÓN DENTADA

Descripción	RESISTENCIA EN FLEXIÓN			
	G2	G1	C16	C24
Promedio [MPa]	40,3	45,6	43,2	55,5
Valor mínimo [MPa]	56,6	79,7	56,8	71,0
Valor máximo [MPa]	22,3	30,2	24,4	33,7
Rango [MPa]	34,4	49,5	32,4	37,3
Tamaño muestra	51	51	52	52
Desviación estándar [MPa]	6,8	9,0	8,1	8,3
Coefficiente de variación (%)	17	20	19	15
5to percentil EN14358	26,9	32,2	27,9	40,1
$K_{0,5,0,75}$	2,0	2,0	2,0	2,0
Tensión característica EN14358 [MPa]	25,7	30,5	26,5	38,5
Tensión característica NCh3028 [MPa]	27,3	32,3	28,0	40,1

Nota: $K_{0,5,0,75}$ es un multiplicador para obtener el límite inferior de tolerancia al 5% con un nivel de confianza del 75%, según EN14358

Cuadro N°12
ESTADÍSTICA DE LA RESISTENCIA EN TRACCIÓN, MAE CON UNIÓN DENTADA

Descripción	RESISTENCIA EN TRACCIÓN			
	G2	G1	C16	C24
Promedio [MPa]	21,5	23,8	24,0	32,8
Valor mínimo [MPa]	42,0	31,6	39,6	44,8
Valor máximo [MPa]	8,1	12,3	11,5	21,2
Rango [MPa]	33,9	19,4	28,1	23,6
Tamaño muestra	51	51	52	52
Desviación estándar [MPa]	6,7	5,0	7,0	4,9
Coefficiente de variación (%)	31	21	29	15
5to percentil EN14358	10,7	14,8	12,1	23,7
$K_{0,5,0,75}$	2,0	2,0	2,0	2,0
Tensión característica EN14358 [MPa]	9,7	13,9	11,1	22,8
Tensión característica NCh3028 [MPa]	10,7	14,8	12,1	23,8

Nota: $K_{0,5,0,75}$ es un multiplicador para obtener el límite inferior de tolerancia al 5%, con un nivel de confianza del 75%, según EN14358

De la estadística descriptiva señalada en los Cuadros N°8 al N°12 se observan coeficientes de variación esperables para un estudio de MAE.

En los Cuadros N°11 y N°12 se observa una diferencia en los resultados de resistencias características de la MAE con unión dentada determinados con la metodología no paramétrica de la norma nacional NCh3028-2 y la norma europea EN14358. Este último método se aprecia más conservador.

Los datos de tensión en flexión y tracción de MAE con unión dentada de menor resistencia y que permitieron determinar los valores característicos, están asociados a probetas cuya falla se generó por defectos de la madera y no de la unión.

En las probetas donde falló la zona de la unión no se identificó fallas con porcentaje mayor a un 10% en la zona del adhesivo.

En los Cuadros N°13 y N°14 las resistencias características en flexión y tracción de la MAE con unión dentada están por sobre las resistencias de la MAE sin unión dentada.

5.2. Resistencia del Elemento Estructural Viga Laminada, según EN14080

5.2.1. Evaluación con el Método 1

El Cuadro N°13 registra para la madera de pino oregon algunas de las propiedades mecánicas de la MAE, obtenidas del Informe Técnico N°225 (INFOR, 2019), de la norma europea EN338 (UNE, 2017) y otras determinadas por este estudio.

Esta información permite identificar la clase de resistencia C de la norma europea EN338 y la clase resistencia T de la norma europea EN14080, que se podría asignar a cada grado mecánico analizado.

**Cuadro N°13
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAE Y CLASES RESISTENTES C Y T**

Asignación de clase de resistencia				
Procedencia	Clasificación de MAE oregón			
	G2	G1	C16	C24
Tensión característica en flexión de la MAE según IT255 [MPa]	17,2	22,7	-	-
Tensión característica en flexión de la MAE según EN338 [MPa]	-	-	16,0	24,0
Tensión característica en tracción de la MAE según IT255 [MPa]	9,2	13,0	-	-
Tensión característica en tracción de la MAE según EN338 [MPa]	-	-	8,5	14,5
Módulo de elasticidad en flexión abatido cuadro N°8 [MPa]	8.523	9.934	9.592	10.924
Clase resistente C, según EN338 [MPa]	C16	C20	C16	C22
Módulo de elasticidad en tracción de la MAE cuadro N°10 [MPa]	7.759	9.014	8.214	9.512
Densidad normal característica de la MAE según IT255 [Kg/m3]	394	394	394	394
Clase resistente T, según EN14080 [MPa]	T9	T11	T10	T12

El Cuadro N°14 registra la razón entre las resistencias características a flexión y tracción de la MAE con unión dentada. Notar que la razón entre las resistencias características de flexión y tracción de la MAE con unión dentada es mayor al factor 1,4, no cumpliendo una de las condiciones del método.

Cuadro N°14
RAZÓN DE RESISTENCIAS, MAE CON UNIÓN DENTADA

Descripción	Grado estructural			
	G2	G1	C16	C24
Resistencia característica en flexión de MAE con unión dentada [MPa]	25,7	30,5	26,5	38,5
Resistencia característica en tracción de MAE con unión dentada [MPa]	9,7	13,9	11,1	22,8
Razón flexión/tracción	2,6	2,2	2,4	1,7

El Cuadro N°15 señala la clase resistente del elemento estructural viga laminada factible de alcanzar con láminas estructurales de pino oregon, visuales y mecánicas, teniendo a la vista la clase resistente T de la MAE sin unión dentada y la resistencia característica en flexión de la MAE con unión dentada.

Cuadro N°15
CLASE RESISTENTE DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL VIGA LAMINADA

Descripción	Grado estructural			
	G2	G1	C16	C24
Resistencia característica en flexión MAE con unión dentada [MPa]	25,7	30,5	26,5	38,5
Clase resistente T, según EN14080 [MPa]	T9	T11	T10	T12
Clase resistente del elemento viga laminada homogénea, EN14080	-	GL20h	GL20h	GL20h
Resistencia característica en flexión del elemento estructural viga laminada, EN14080 [MPa]	-	20	20	20

5.2.2. Evaluación con el Método 2

El Cuadro N°16 señala la aplicación de la fórmula y la condición de aplicabilidad requerida para este método.

Cuadro N°16
RESISTENCIA CARACTERÍSTICA EN FLEXIÓN ELEMENTO ESTRUCTURAL VIGA LAMINADA

Descripción	Grado estructural			
	G2	G1	C16	C24
Resistencia característica flexión MAE con unión dentada [MPa] $f_{m,j,k}$	25,7	30,5	26,5	38,5
Resistencia característica en tracción de la MAE [MPa] $f_{t,0,l,k}$	9,2	13,0	8,5	14,5
Condición de aplicabilidad $1,4 * f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1,4 * f_{t,0,l,k} + 12$	NO	NO	NO	SI
Resistencia característica flexión elemento estructural laminado [MPa] $f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 \left(\frac{f_{m,j,k}}{1,4} - f_{t,0,l,k} + 6 \right)^{0,65}$	19,8	23,6	19,5	26,5

El Cuadro N°17 es una propuesta de reemplazo del factor 1,4 por la razón de tensión de flexión y tracción de la MAE con unión dentada calculada en el Cuadro N°14. Esto permitirá ajustar la formula y la condición de aplicabilidad a este método. Se observa que en todos los grados estructurales de MAE se cumple con el rango de aplicabilidad modificado

Cuadro N°17
RESISTENCIA CARACTERÍSTICA EN FLEXIÓN DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL VIGA LAMINADA

Descripción	Grado estructural			
	G2	G1	C16	C24
Tensión característica flexión MAE con unión dentada [MPa] $f_{m,j,k}$	25,7	30,5	26,5	38,5
Tensión característica tracción MAE [MPa] $f_{t,0,l,k}$	9,2	13,0	8,5	14,5
Razón flexión/tracción	2,6	2,2	2,4	1,7
Condición de aplicabilidad $Razón * f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq Razón * (f_{t,0,l,k} + 8,6)$	SI	SI	SI	SI
Tensión característica flexión elemento estructural viga laminada [MPa] $f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 \left(\frac{f_{m,j,k}}{Razón} - f_{t,0,l,k} + 6 \right)^{0,65}$	16,2	20,2	16,3	24,8

6. CONCLUSIONES

Si bien es posible con el método 1 asignar una clase de resistencia T a los grados estructurales considerados por la norma chilena para la MAE de pino oregon, no es posible asignar una clase de resistencia de viga laminada (GL). Esto debido a que la razón entre los valores característicos de flexión y tracción de la MAE con unión dentada no cumplió con la condición de ajustarse a 1,4.

Debido a que la condición de aplicabilidad del segundo método no se cumple para todos los grados, el cálculo de tensión característica del elemento estructural de viga laminada pierde validez. Sin embargo, es posible estudiar un ajuste de la fórmula y sus rangos de aplicabilidad al disponer de ensayos de flexión y tracción de MAE con unión dentada.

A pesar de que no fue posible asignar o calcular propiedades mecánicas al elemento estructural viga laminada, ocupando directamente ambos métodos señalados en la norma europea EN14080. Si se ha avanzado en proponer ajustes que permitan adaptar esta norma a la realidad nacional. Estos cambios deben estar basados en ensayos mecánicos a probetas de grandes dimensiones de vigas laminadas que complementen los resultados ya obtenidos en este estudio.

7. REFERENCIAS

INFOR, 2019. Tensiones admisibles de la madera aserrada estructural de pino oregon clasificada visualmente. Instituto Forestal, Chile. Informe técnico N°225. En: <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/29196>

INFOR, 2021. Madera y Construcción. Hacia una simbiosis estratégica. Instituto Forestal, Chile. En: <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/31291>

INN, 1991. NCh 2165:1991. Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata. Instituto Nacional de Normalización, Chile. En: <https://ecommerce.inn.cl/nch2165199143932>

INN, 2017a. 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, 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>

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, 2016a. EN, 2016. UNE-EN 338. Madera estructural. Clases resistentes. Normalización Española. En: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0057443>

UNE, 2016b. 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>

UNE, 2017. UNE-EN 14080. Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos. Normalización Española. En: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0052410>

8. ANEXO FOTOGRAFÍAS

En las probetas de los ensayos flexión y tracción de MAE con unión dentada, las fallas se presentaron generalmente en el sector de la unión. También se pudo observar, en menor medida, fallas en zonas con defectos nudosos y desviación de fibra.

La falla presente en la zona de la unión presentó desprendimiento de adhesivo en áreas menores al 15%.

En los ensayos de flexión la falla ocurrió en el tramo del tercio central y en la zona flexo-traccionada. Las Figuras N°11 a N°14 muestran los tipos de fallas encontradas de los ensayos ejecutados en flexión.



Figura N° 11
FALLA TÍPICA EN LA BASE DEL DIENTE



Figura N° 12
FALLA TÍPICA EN ZONA FLEXO-TRACCIONADA



Figura N° 13
FALLA POCO COMÚN EN PAREDES DEL DIENTE



Figura N° 14
FALLA EN ZONA NUDOSA

En los ensayos de tracción la falla ocurrió entre las mordazas y principalmente en el medio de la probeta, zona donde se ubica la unión dentada. Las Figuras N°15 a N°18 muestran las fallas encontradas de los ensayos de tracción de MAE con unión dentada.



Figura N° 15
FALLA TÍPICA EN PAREDES DEL DIENTE



Figura N° 16
FALLA TÍPICA EN LA BASE DEL DIENTE



Figura N° 17
FALLA EN ZONA NUDOSA



Figura N° 18
FALLA EN ZONA NUDOSA



INFOR

www.infor.cl