



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**PRODUCCIÓN DE VIGAS DE MADERA LAMINADA
ENCOLADA DE ALTA CAPACIDAD RESISTENTE MEDIANTE LA
UTILIZACIÓN DE MADERA ASERRADA DE PINO RADIATA
CLASIFICADA MECÁNICAMENTE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GUSTAVO JAVIER DONOSO SOLÍS

PROFESOR GUÍA:

MARIO WAGNER MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

FEDERICO DELFÍN ARIZTIA

VLADIMIR TORRENS FÚNEZ

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil

AUTOR: Gustavo Javier Donoso Solís

FECHA: 2016

PROFESOR GUÍA: Mario Wagner Muñoz

**PRODUCCIÓN DE VIGAS DE MADERA LAMINADA ENCOLADA DE ALTA
CAPACIDAD RESISTENTE MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MADERA
ASERRADA DE PINO RADIATA CLASIFICADA MECÁNICAMENTE**

Tradicionalmente, en Chile se han aplicado procesos de clasificación visual para seleccionar las láminas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada (MLE). Por otro lado, estudios desarrollados en Europa han concluido que las propiedades que influyen significativamente en la capacidad resistente de la madera son el módulo de elasticidad, la inclinación de la fibra y la densidad. Estos atributos son complejos de controlar visualmente en un proceso industrial y por lo tanto se propone la utilización de grados mecánicos.

Este trabajo de título explora potenciales incrementos en la capacidad resistente y rigidez en vigas de MLE de Pino radiata (PR), a través de procesos de clasificación basados en la densidad y la inclinación de fibra.

De acuerdo a F. Colling una mejora en la calidad estructural de vigas de MLE sólo es alcanzable mediante un aumento de calidad de sus dos componentes: uniones endentadas y láminas de madera. En cuanto a las uniones endentadas se analiza el incremento de resistencia en empalmes, al modificar la producción y el adhesivo. Por lo cual, de acuerdo a los antecedentes de 95 probetas ensayadas a flexión y 160 a tracción, se identifica el criterio de producción, adhesivo escogido y resistencias alcanzadas.

Por su parte, para evaluar la influencia de las láminas, se analizan incrementos en resistencia y rigidez en vigas, al variar su calidad y disposición. Se proponen así, 17 series, las cuales se forman al combinar 2 láminas clasificadas visualmente y 2 mecánicamente. Estas pueden estar dispuestas horizontalmente en toda la altura o ubicarse de manera vertical exclusivamente en el borde flexotraccionado.

Los ensayos de 54 probetas arrojan que la incorporación de láminas de grados mecánicos aumenta el Módulo de Rotura (MR) a flexión característico entre un 40-50% y el Módulo de Elasticidad (MoE) medio en 45%, versus vigas con láminas clasificadas visualmente. Además, la ubicación de láminas verticales en la zona flexotraccionada arroja un aumento de MR a flexión característico entre un 30-40%, en contraste con el MoE medio que no experimenta cambios en comparación con vigas de láminas horizontales. Finalmente con ambas mejoras, el MR aumenta en 95% y el MoE en 50% con respecto a la viga tipo que se fabrica actualmente en el país.

Agradecimientos

A Lucía, mamá, por encausarme día a día con mucho cariño a ser mejor persona. A Luis Manuel, papá, por estar ahí cuando te necesito. A Mi hermano, Francisco, por complementar enormemente todos mis conocimientos siempre gracias a tu compañía, sana competencia y discusiones que duran horas. Además de tu ayuda a editar la tesis. A Franccce, mi polola, por abrir mi mundo a nuevos gustos, por tu cariño y a maravillarme e intrigarme con la mente femenina por cuatro años. Además de tu ayuda en la edición de la tesis. Muchas gracias a ustedes.

A Mario Wagner, profe guía, por contestar todas las dudas que tuve, no sólo en cuanto a la tesis; por contestar amablemente todas y cada una de las veces que lo llamé por teléfono; por contestar todos los emails y por recibirme a todas horas en su oficina, muchas gracias profe. A Federico Delfín y Vladimir Torrenz, miembros de la comisión, por corregir efectivamente este documento.

A Carolina Urrutia y Juan Becerra, de Arauco S.A, por creer en este proyecto y contestar amablemente mis dudas. A Eduardo Pérez, Gustavo Celis y Ernesto Ramírez, miembros del laboratorio LIMUS de USACH, por la realización de los ensayos de las vigas y por aceptarme en el laboratorio.

A los losas: A, C, D, F, G, M, M, P, P, P y V por esas tarde de estudio que nada estudiamos pero mucho reímos. A los Amigos y amigas de Plan Común: A, C, C, C, G, J, J, M, M, M, M, N, R y V por lo san Martes, la terraza y el As. A los Cabros: C, I, J, M, N, Q, R y S por hacerme reír todos los días y vernos seguido.

A los Profesores Osses, Beltrán y Moffat por enseñarme por las malas que ir a clases era obligatorio, y a la Profe Quenita Díaz, por enseñarme a la buena que lo importante no es la nota sino que aprender y para eso, no sirve hacer trampa.

Para

Lucía Cristina Solís Maturana

Y en memoria de

Luís Manuel Donoso Zañartu.

Tabla de Contenido

Agradecimientos	iii
Tabla de Contenidos	v
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tablas.....	x
Índice de Gráficos	xiii
Capítulo 1 Introducción	14
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo general	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
1.2 Hipótesis.....	18
Capítulo 2 Presentación	19
2.1 El Problema de investigación	19
2.2 Alcances	20
2.3 Resultados esperados	20
2.4 Metodología.....	21
2.5 Descripción componentes viga de MLE	22
2.6 Madera utilizada para la fabricación de MLE	23
2.6.1 Situación vigente en industria nacional	23
2.6.2 Características de la madera utilizada en la fabricación de vigas de alta capacidad resistente	26
2.6.3 Comparación propiedades mecánicas entre láminas clasificadas visual y mecánicamente.	30

2.7	Marco teórico.....	31
2.7.1	Propiedades de la madera	31
2.7.2	Conceptos claves	33
2.8	Revisión bibliográfica	34
2.8.1	Colling	35
2.8.2	Blass	50
2.8.3	Sandoz	54
2.8.4	Schickhofer	63
Capítulo 3 Experiencias Nacionales: Exigencias de armado y Evolución de Propiedades Mecánicas.		66
3.1	Exigencias de armado en Chile.....	66
3.1.1	Fabricación de los elementos estructurales.....	67
3.2	Evolución de las propiedades mecánicas de la MLE en Chile .	69
3.2.1	Consecuencias prácticas	70
3.2.2	Derivación tensiones básicas	75
Capítulo 4 Antecedentes ensayos uniones endentadas.....		77
4.1	Introducción	77
4.1.1	Metodología	78
4.2	Resultados ensayos uniones endentadas	80
Capítulo 5 Programa experimental vigas.....		83
5.1	Vigas	83
5.2	Descripción del ensayo de vigas.....	89
Capítulo 6 Resultados.....		92
6.1	Resistencia - Módulo de rotura.....	92

6.1.1	Resultados programa experimental	92
6.2	Rigidez - Módulo de elasticidad	95
6.2.1	Resultados programa experimental	95
Capítulo 7	Discusión de resultados	97
7.1	Series 2 y 2B.....	97
7.2	Resistencia - Módulo de rotura	98
7.2.1	Análisis del modo de rotura en las vigas ensayadas.....	98
7.2.2	Comparación valores característicos	124
7.3	Rigidez - Módulo de elasticidad	136
7.3.1	Análisis del modo de rotura en las vigas ensayadas.....	136
7.3.2	Comparación valores característicos	139
7.4	Modelos de predicción de resistencia	142
7.4.1	Propiedades mecánicas.....	142
7.4.2	Cálculo resistencia característica viga MLE, norma EN 1480 (2013)	143
7.4.3	Cálculo resistencia característica viga MLE, norma EN 1194 (1999)	145
7.4.4	Comparación resultados experimentales con analíticos ...	146
Capítulo 8	Conclusiones.....	147
	Bibliografía	157
	Apéndice A: Cálculo del valor estadístico asociado al percentil 5% ...	160
	Apéndice B: Tablas de resultados	163
8.1	Módulo de rotura.....	163
8.2	Módulo de elasticidad	166

Índice de Figuras

Figura 2-1: Esquema referencial partes que componen una viga.....	22
Figura 2-2: Esquema referencial partes que componen una viga, parte 2.	23
Figura 2-3: Método por vibración.....	26
Figura 2-4: Método por radiación.....	28
Figura 2-5: Madera ya marcada.....	28
Figura 2-6: Máquina EasyScan que realiza la clasificación de la madera.	29
Figura 2-7: Esquemmatización ejes axial (A), radial (R) y tangencial (T).	32
Figura 2-8: Nudo e inclinación de la fibra.....	32
Figura 2-9: Esquema modelo viga.....	37
Figura 2-10: Distintas disposiciones para la MBSH.	57
Figura 2-11: Comparación módulo de elasticidad y módulo de rotura en flexión versus resultados de velocidad ultrasónica promedio.	59
Figura 3-1: En la zona más oscura (—) las distancias entre uniones deben ser mayores o iguales a 1.8 m. En la zona de color blanco no hay restricciones de largo entre uniones.....	68
Figura 3-2: Extracto de la figura anterior. En las zonas de color — y — se debe respetar una distancia mínima entre uniones de 15 cm, distancia que está representada por las líneas de color blanco.....	68
Figura 4-1: Esquema referencial ensayo a flexión	78
Figura 4-2: Esquema de ensayo de tracción con pieza centrada.....	79
Figura 5-1: Cortes transversales de vigas a ensayar. Laminación horizontal.	88
Figura 5-2: Cortes transversales de vigas a ensayar. Laminacion vertical en cuarto inferior.....	88

Figura 5-3: Detalle ensayo y probeta típica del ensayo a flexión.	89
Figura 5-4: Diagrama carga-deformación en el rango elástico.	91
Figura 5-5: Viga de MLE (Pino radiata) durante ensayo a flexión.....	91
Figura 5-6: Ampliación vista ensayo, puntos de carga.	91
Figura 6-1: Leyenda ejemplo serie 2.	93
Figura 7-1: Elementos y designaciones geométricas de un perfil típico del empalme dentado.....	122

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Exigencias comunes sobre ambos grados.	24
Tabla 2-2: Exigencias sobre el módulo de elasticidad aparente, E_f , con el procedimiento establecido en NCh 2149 Of.89.	25
Tabla 2-3: Exigencias visuales.....	25
Tabla 2-5: Tensiones admisibles grados MGP.	30
Tabla 2-4: Tensiones admisibles grados visuales.	30
Tabla 2-6: Comparación calidades, se presentan los incrementos con las calidades visuales como referencia.....	31
Tabla 2-7: Exigencias sobre las propiedades de las láminas	40
Tabla 2-8: Exigencias sobre las propiedades de la madera de las tablas. E en MPa.	42
Tabla 2-9: Valores característicos de MLE y MBSH en ensayos a flexión.	61
Tabla 3-1: Propiedades mecánicas admisibles MLE PR, NCh 2165-1989	76
Tabla 4-1 Detalle probetas ensayos uniones endentadas.....	78
Tabla 4-2: Resultados abreviados ensayos uniones endentadas.....	81
Tabla 4-3: Resistencias características ensayos uniones endentadas, flexión y tracción.	82
Tabla 5-1: Detalle series vigas.	87
Tabla 7-1: Test T-Student para Serie 2 y 2B.	98
Tabla 7-2: Detalle viga S1-01.	103
Tabla 7-3: Detalle viga S1-04.	104
Tabla 7-4: Detalle viga S2-02.	105
Tabla 7-5: Detalle viga S2-04	106

Tabla 7-6: Detalle viga S3-01.	107
Tabla 7-7: Detalle viga S4-02.	108
Tabla 7-8: Detalle viga S5-01.	109
Tabla 7-9: Detalle viga S6-01.	110
Tabla 7-10: Detalle viga S7-01.....	111
Tabla 7-11: Detalle viga S8-02.....	112
Tabla 7-12: Detalle viga S9-01.....	113
Tabla 7-13: Detalle viga S10-03.....	114
Tabla 7-14: Detalle viga S11-03.....	115
Tabla 7-15: Detalle viga S12-03.....	116
Tabla 7-16: Detalle viga S13-02.....	117
Tabla 7-17: Detalle viga S14-02.....	118
Tabla 7-18: Detalle viga S15-03.....	119
Tabla 7-19: Detalle viga S2B-05.....	120
Tabla 7-20: Detalle viga S2-06.....	121
Tabla 7-21: Comparación dimensiones Uniones endentadas norma europea con vigas fabricadas.	122
Tabla 7-22: Módulos de rotura característicos.	125
Tabla 7-23: Magnitudes del MRk para cuantificar el efecto laminación vertical en cuarto inferior.....	127
Tabla 7-24: Incremento en resistencia a flexión al incorporar ambas mejoras.....	131
Tabla 7-25: MRk para cuantificar el efecto simetría, laminación horizontal.	132
Tabla 7-26: Efecto asimetría, vigas laminación vertical en cuarto inferior.	134
Tabla 7-27: Prueba T Student series con láminas visuales.	135

Tabla 7-28: Módulos de Elasticidad característicos y Cv para cada una de las series.....	139
Tabla 7-29: Comparación vigas laminación vertical en borde flexotraccionado, MoE.	140
Tabla 7-30: Incremento del Módulo de Elasticidad al incorporar ambas mejoras.....	141
Tabla 7-31: Valores propiedades mecánicas láminas y uniones endentadas MGP12.	142
Tabla 7-32: Datos series 2 y 2B juntas.....	146

Índice de Gráficos

Gráfico 2-1: Riesgo de falla en la unión endentada.	35
Gráfico 2-2: Ensayos de flexión según el mecanismo de falla.	36
Gráfico 2-3: Resultados experimentales flexión vigas para diferentes parámetros de clasificación mecánica.	40
Gráfico 2-4: Resultados de los ensayos de flexión con uniones endentadas.	43
Gráfico 2-5: Resistencia de flexión característica de vigas de MLE en función de la resistencia a tracción característica de las láminas.	45
Gráfico 2-6: Resistencia a flexión característica viga MLE en función de las resistencias de flexión características de las uniones endentadas.	47
Gráfico 2-7: Resistencia a tracción probable de cuatro grados de calidad de la madera.	54
Gráfico 2-8: Comparación ensayos del módulo de elasticidad y el módulo de rotura en flexión de una pieza de MLE, versus los resultados de velocidad ultrasónica promedio.	56
Gráfico 2-9: Comparación entre densidades estadísticas de resistencias de vigas de MLE y de vigas de MBSH fabricadas con grados estructurales superiores.	60
Gráfico 3-1: relación empírica entre la razón I_n/I_g y la Razón de Resistencia en flexión.	73
Gráfico 6-1: Resultados experimentales flexión vigas para diferentes parámetros de clasificación mecánica y disposición de láminas.	94
Gráfico 6-2: Módulo de elasticidad para cada una de las tipologías.	96
Gráfico 7-1: Resultados experimentales flexión vigas. Serie 2 y 2B están combinadas.	99
Gráfico 7-2: Resultados experimentales agrupados por tipo de laminación.	102
Gráfico 7-3: Resultados experimentales Módulo de Elasticidad para todas las series.	137

Capítulo 1 Introducción

Actualmente las piezas de madera laminada encolada (MLE) se usan preferentemente en la estructuración parcial o total de naves industriales, deportivas, comerciales y de culto de envergadura mediana (luces de hasta 30m). En este nicho, compiten contra estructuras en acero, especialmente cuando existen ambientes corrosivos agresivos como zonas litorales, industrias químicas y piscinas temperadas.

Existe una oportunidad concreta de incrementar la competitividad del material en el mercado al mejorar el desempeño actual del material. Lo cual se puede lograr gracias al uso de materia prima clasificada en función de los parámetros que influyen directamente sobre la resistencia: módulo de elasticidad, inclinación de la fibra, densidad y nudosidades.

En Chile se han aplicado tradicionalmente procesos de clasificación visual para seleccionar la madera destinada a la fabricación de MLE, aun cuando la normativa vigente permite recurrir a la clasificación mecánica basada en el control de módulo de elasticidad (NCh 2150), bonificando esta práctica con resistencias de flexión y compresión algo incrementadas (NCh 2165).

Estudios, desarrollados en Europa (Colling, 1995) (Schickhofer, 2001), han concluido que las propiedades que condicionan decisivamente la capacidad resistente de la madera son, aparte del módulo de elasticidad, la inclinación de la fibra y la densidad. Atributos que no se pueden o bien son excesivamente complejos de controlar visualmente en un proceso industrial.

En un informe de F. Colling, que refleja el estado del arte de la industria de MLE alemana de fines del siglo pasado (STEP 3: Informationdienst Holz 1995), se comparan resistencias de flexión de vigas fabricadas con madera clasificada por medio de ambos criterios. En este estudio, la calidad de la madera clasificada mecánicamente se fundamenta en el módulo de elasticidad o la densidad. Concluyéndose que las resistencias de las vigas clasificadas mecánicamente superan al menos en un 30% a las vigas fabricadas usando el mejor grado visual.

Por otro lado, algo similar plantea G. Schickenhofer en la presentación de un proyecto de la industria austriaca de MLE que buscaba evaluar la incorporación de criterios de clasificación mecánica, en la "Vigésima Octava Jornadas de Perfeccionamiento de la Sociedad Suiza de Investigación en Madera" de 1996.

Ambos estudios se pueden resumir en dos afirmaciones:

En primer lugar, la producción de vigas de madera laminada encolada con alta capacidad resistente requiere necesariamente de una segregación de la madera utilizada para la fabricación de láminas, que considere al menos una de las siguientes propiedades: módulo de elasticidad, inclinación de la fibra y densidad. Las que coincidentemente no son cuantificables por medio de apreciación visual.

En segundo lugar, la calidad mecánica de los empalmes dentados (finger-joints, uniones endentadas) de las piezas así clasificadas, debe ser similar a la calidad de la madera. Ya que, de lo contrario la capacidad resistente de la viga se agotará prematuramente por la falla del empalme, independientemente del potencial resistente de la madera.

En consecuencia, la MLE se puede asimilar como una amalgama de dos materiales: la madera y las uniones dentadas. Donde la capacidad resistente de la amalgama queda condicionada por el más débil de ambos.

No tiene sentido entonces, preocuparse exclusivamente de la calidad de la madera si no se le da la debida atención a la calidad estructural de las uniones endentadas utilizadas para la fabricación de las láminas.

En efecto, en la reciente norma europea relacionada con la fabricación de madera laminada encolada, EN 14080 (UNE, 2013), se especifica la resistencia de flexión de las vigas de madera laminada encolada de especies coníferas en función de la **resistencia a tracción** de las láminas y de la **resistencia de flexión** de los empalmes endentados de las láminas.

Adicionalmente, de acuerdo a Sandoz, 1996 se establece que la incorporación de láminas dispuestas verticalmente en el cuarto inferior de la viga disminuye la variabilidad de los datos en la mitad y aumenta la resistencia entre el 40 al 60%, con respecto a los actuales valores admisibles en Europa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

El objetivo general es analizar el efecto de variar la calidad de uniones endentadas, tanto como la clasificación y la disposición de láminas, para cuantificar cambios en la resistencia y rigidez de vigas de MLE.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar la resistencia a flexión y tracción de uniones endentadas fabricadas con diferentes adhesivos y métodos de producción, para definir las características de las uniones endentadas a utilizar en las vigas.
- Ensayar vigas fabricadas de acuerdo a la práctica actual, que corresponde a utilizar láminas clasificadas visualmente, para comparar la resistencia y rigidez obtenidas con los resultados de series de vigas que consideran el uso de grados mecánicos MGP12 y MGP10.
- Comparar la resistencia y rigidez entre vigas fabricadas mediante laminación horizontal y vigas de laminación vertical en el borde flexotraccionado.
- Comparar la resistencia y rigidez entre vigas simétricas y asimétricas con laminación horizontal. Y entre vigas simétricas y asimétricas de laminación vertical en el borde flexotraccionado.
- Comparar las resistencias empíricas con las resistencias calculadas mediante los modelos de predicción incorporados en la norma europea. (EN 1194:1999 y EN 14080:2013)

1.2 Hipótesis

La hipótesis de este trabajo de título corresponde a: la verificación de que por medio de un aumento en la calidad de las láminas, a través de procesos de clasificación mecánica y de un mejor control de la calidad de las uniones endentadas, se obtendrá un aumento sustantivo en resistencia y rigidez de vigas de MLE. Y en segundo lugar, se desea verificar que la disposición de láminas verticalmente en la zona flexotraccionada se traduce en aumentos considerables de resistencia a flexión y rigidez flexional.

Capítulo 2 Presentación

En este segundo capítulo, se familiariza al lector con la temática de esta obra por medio de, la presentación del problema de investigación, los resultados esperados y la metodología. Luego, se realiza una descripción de conceptos relacionados con la fabricación de los elementos, la descripción de las calidades de láminas a usar y finalmente se presenta un detalle de los autores y referencias usadas para la realización de este Trabajo de Título.

2.1 El Problema de investigación

El problema de investigación es encontrar mediante ensayos a flexión, la o las combinaciones de calidades de láminas que influyen mayormente en la resistencia y rigidez de la viga. Esto se realiza a través de ensayos a rotura en probetas de 17 configuraciones diferentes de calidades y disposiciones de láminas.

Además, se quiere determinar la influencia de la unión endentada y su calidad en la resistencia a flexión de la viga, mediante la revisión de ensayos anteriores a esta obra y un análisis visual del tipo de falla de las probetas que menos resistieron.

Complementariamente, se desea comparar los resultados obtenidos con fórmulas de predicción de la resistencia a flexión presentes en la normativa europea, tanto en su versión actual como en la versión pasada.

2.2 Alcances

La comparación de las distintas series de vigas se realiza en base al análisis de los resultados experimentales obtenidos al variar las calidades y disposición de las láminas, en cuanto al módulo de rotura y módulo de elasticidad. Correspondiendo a un análisis general de cada una de las vigas y por lo tanto, no se presenta un estudio más local para cada una de las probetas, ya sea, un cálculo de distribución de tensiones o un análisis mediante elementos finitos.

Tampoco se presenta en detalle una investigación de los antecedentes de ensayos de probetas de uniones endentadas a flexión y tracción. Por lo tanto, sólo se muestran los valores obtenidos de las resistencias, sin entrar en detalle en las diferencias entre cada serie de probetas de uniones endentadas. Valores que se utilizan en el cálculo de las resistencias predichas por dos normas europeas.

2.3 Resultados esperados

A medida que se utilizan combinaciones de láminas clasificadas con criterios más restrictivos, clasificación mecánica, se espera obtener una mayor resistencia a flexión y rigidez flexional de las vigas ensayadas.

Con una producción e inspección más estrictas, se debería encontrar un aumento de resistencia a flexión y tracción en las uniones endentadas.

Por otro lado, para igual calidad de láminas pero distinto tipo de laminación, se espera que las vigas con laminación vertical en el borde flexotraccionado arrojen valores mayores, tanto en resistencia como en rigidez, en comparación a una viga con laminación horizontal.

Finalmente, se pretende que los modelos de predicción de resistencia europeos entreguen resultados similares a los encontrados empíricamente.

2.4 Metodología

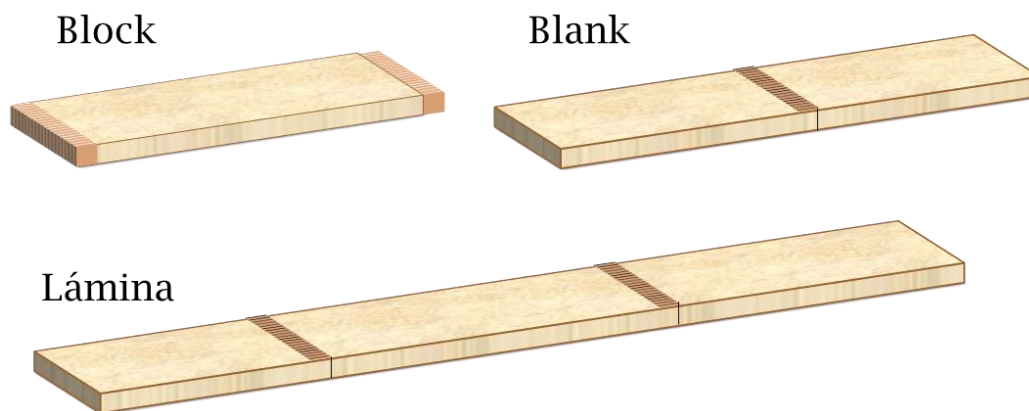
1. Revisión bibliográfica. Experiencias nacionales e internacionales.
2. Análisis de resultados de los antecedentes de ensayos de probetas con uniones endentadas. Identificación del tipo de endentado y adhesivo a utilizar.
3. Definición de ensayos, calidad de láminas, probetas e implementación experimental.
4. Batería de ensayos de vigas fabricadas utilizando grados visuales definidos en la norma NCh 2150 de acuerdo a la práctica nacional actual.
5. Batería de ensayos de vigas de MLE fabricadas combinando láminas clasificadas visual y mecánicamente.
6. Batería de ensayos de vigas de MLE fabricadas con laminación horizontal y con laminación vertical en la zona flexotraccionada mediante la combinación de láminas clasificadas visual y mecánicamente.
7. Discusión de resultados empíricos para las probetas propuestas: discusión en base al módulo de rotura a flexión, discusión en base al módulo de elasticidad y discusión por modo de falla.
8. Discusión de resultados al comparar valores empíricos con el cálculo de resistencia que establece la normativa europea (EN 1194:1999 y EN 14080:2013).
9. Conclusión de resultados.

2.5 Descripción componentes viga de MLE

Dentro del vocabulario utilizado en la planta de vigas de Arauco S.A., la cual fabricó las probetas utilizadas en este trabajo de título, los términos más relevantes son los siguientes:

Una viga de MLE se compone de trozos de madera de calidad predefinida que se conocen como **blocks** (singular: *block*), a los cuales una máquina fresadora les realiza cortes en forma de dientes, formando así las uniones endentadas. La unión de dos *blocks* gracias a estos dientes, previamente encolados, se denomina **blank** (pl. *blanks*). La unión de varios *blocks* y por lo tanto, de varios *blanks*, se denota como **lámina**. Las que unidas transversalmente, por medio de la línea de cola en la interfaz de los elementos, se conoce finalmente como **viga**, ya que trabajará en flexión. (figura 2-1 y figura 2-2)

Figura 2-1: Esquema referencial partes que componen una viga.

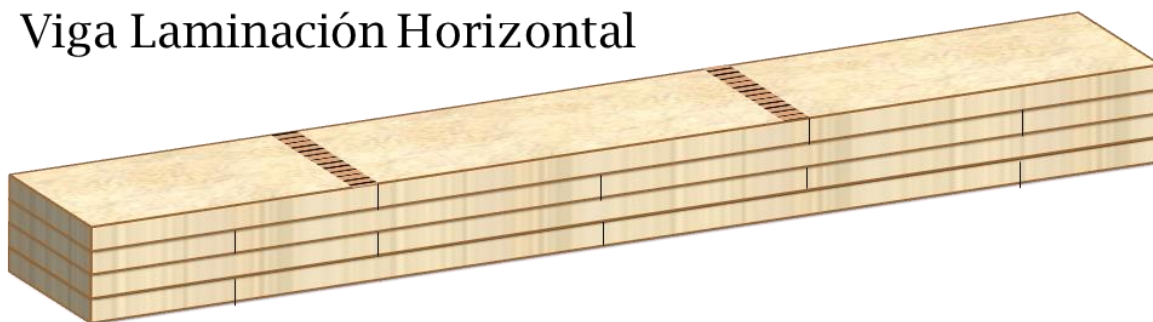


Referencia: Elaboración propia.

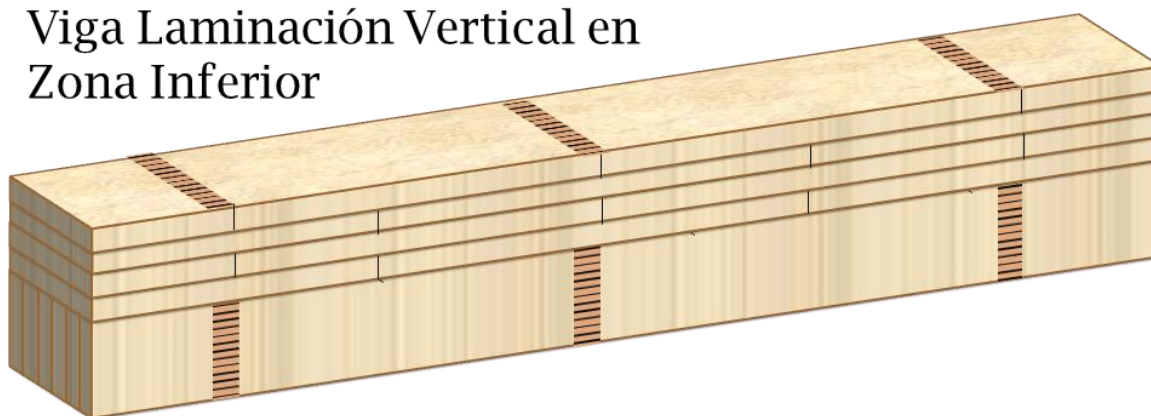
Por otra parte, existen variadas maneras de disponer las láminas. Para esta memoria de título, las más relevantes son: laminación horizontal en toda su altura y laminación vertical en el borde flexotraccionado (laminación horizontal combinada con laminación vertical, preferentemente en la zona inferior), como se aprecia en la figura 2-2.

Figura 2-2: Esquema referencial partes que componen una viga, parte 2.

Viga Laminación Horizontal



Viga Laminación Vertical en Zona Inferior



Referencia: Elaboración propia.

2.6 Madera utilizada para la fabricación de MLE

2.6.1 Situación vigente en industria nacional

Las exigencias sobre las piezas de madera aserrada de Pino radiata utilizadas en el proceso de fabricación de láminas, se establecen en la norma NCh 2150 Of.89, modificada en 1991. Este documento, abre la posibilidad de llevar a cabo la clasificación por medio de procedimientos de control visual o bien, recurriendo a un proceso mecánico, basado en la determinación experimental del módulo de elasticidad de las piezas.

La norma define 2 grados designados como: Grado A y Grado B. Lo cual corresponde a piezas de capacidad estructural buena y moderada, respectivamente.

Las exigencias se establecen en las siguientes tablas: Tabla 2-1, Tabla 2-2 y Tabla 2-3.

Tabla 2-1: Exigencias comunes sobre ambos grados.

Característica		Exigencia			
Alabeos	Acanaladura	Espesor (mm)	Ancho (mm)		
			≤ 100	150	≥ 200
		25	0	1	3
		38	0	1	2
	50	0	0	1	
	Otros	≤ 12 mm cada 360 cm de longitud			
Contenido de humedad		≤ 16 %			
Manchas y médula		Se acepta mancha azul y médula en el Grado B, excepto en las 2 láminas externas en ambos cantos			
Pudrición y perforación		n.s.a			
Resina		n.s.a. e altos contenidos en la superficie a encolar			
Agujeros y Nudos		Si se ubican en el 20% extremo de la longitud de la pieza se controlan según Tabla 3			
Arista Faltante		< 4 mm, debiendo desaparecer e el cepillado final de la pieza fabricada			

Referencia: NCh 2150 Of.89, modificada en 1991

Clasificación Mecánica

La clasificación mecánica considera el ensayo en flexión de piezas de madera aserrada, dispuestas abatidas, mediante la aplicación de una carga concentrada a mitad de luz, de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma NCh 2149 para la estimación del módulo de elasticidad aparente, E_f .

Tabla 2-2: Exigencias sobre el módulo de elasticidad aparente, E_f , con el procedimiento establecido en NCh 2149 Of.89.

Grados	E_f [MPa]
A	$E_f \geq 9.000$
B	$9.000 > E_f \geq 4.000$

Referencia: NCh 2149. Of.89

La norma exige una distancia entre apoyos de al menos a 60 veces el espesor de la pieza ensayada. E_f se calcula con la siguiente expresión:

$$E_f = \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot t^3} \cdot \frac{P}{\delta} \text{ [MPa]} \quad (2-1)$$

Donde L : distancia entre apoyos, mm.

b : ancho de la pieza ensayada, mm.

t : espesor de la pieza ensayada, en mm.

P : carga aplicada, en N.

δ : descenso inducido a mitad de luz por carga aplicada, en mm.

Clasificación Visual

La restricción sobre las nudosidades se puede asociar a un $RAN \leq 0,35$ y $RAN \leq 0,50$, para tablas de los Grados A y B respectivamente, donde RAN corresponde a la razón de área nudosa.

Tabla 2-3: Exigencias visuales.

Característica	Grado A	Grado B
Agujeros y nudos	Suma de nudos en cada tramo de 30 cm de largo, considerado en intervalos de 6 cm	
	$\leq 0,35^* \text{ ancho}$	$\leq 0,50^* \text{ ancho}$
Desviación fibra	$< 1 : 10$	$< 1 : 8$
Grietas y rajaduras	Inclinación $> 45^\circ$ con respecto al plano de la cara	
Velocidad de crecimiento	$> 0,8 \text{ anillo / cm}$	$> 0,7 \text{ anillo / cm}$

Referencia: NCh 2150 Of.89, modificada en 1991.

2.6.2 Características de la madera utilizada en la fabricación de vigas de alta capacidad resistente

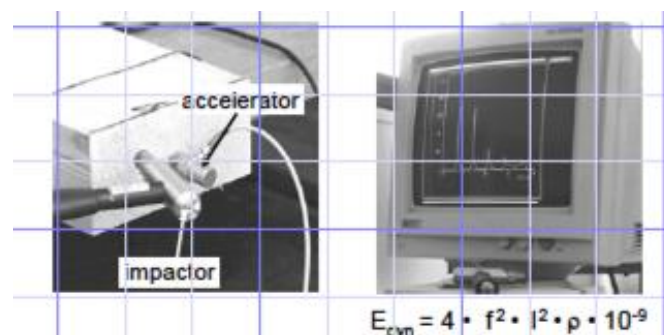
Las vigas de madera laminada encolada de Pino radiata investigadas en el presente estudio corresponden a los Grados Estructurales Mecánicos MGP 12 y MGP 10, incorporados en la reciente redacción de la norma de cálculo de estructuras de madera, NCh 1198Of.2014. La designación MGP corresponde a *Machine Graded Pine* y refleja productos estructurales del mercado australiano y neozelandés. La denominación, está determinada por el valor del módulo de elasticidad (MoE), de modo que: MoE=12700 para MGP12 y MoE=10700 para MGP10.

Descripción método de clasificación

Determinación módulo de elasticidad promedio

El módulo de elasticidad puede determinarse midiendo la frecuencia de resonancia de la velocidad ultrasónica. La forma más apropiada de llevar a cabo ensayos, por medio de vibraciones, es a través de la medición de la frecuencia de resonancia a través de ondas longitudinales (Figura 2-3). Donde la pieza de madera es impactada en un extremo y la vibración puede medirse libre de contacto por medio de un micrófono o un sistema laser. Para conocer la frecuencia de resonancia, se requiere conocer la longitud de la pieza.

Figura 2-3: Método por vibración.



Referencia: (Glos, 2004)

El módulo de elasticidad promedio puede calcularse con la frecuencia de resonancia, largo y densidad. Esto significa que, un equipo de clasificación que se limite a registrar la frecuencia de resonancia, es menos eficiente que un equipo que registre la frecuencia y la densidad de la madera.

Con el método de vibraciones sólo se puede determinar el módulo de elasticidad promedio de la madera. Por lo cual, esta medición no entrega información relativa al tamaño de algún defecto o a la ubicación de los sectores más debilitados.

Determinación de densidad

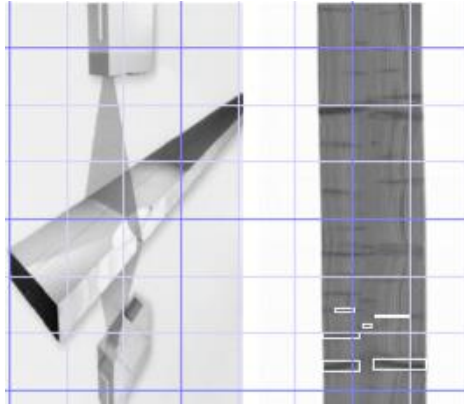
La densidad se puede determinar por medio de radiación o a través de la edición del peso y las dimensiones de la madera. Para medir las dimensiones existe una gran cantidad de sistemas electro-mecánicos y ópticos (laser). En cuanto a la radiación, se realiza gracias a micro ondas, rayos X o gamma. Donde, mientras mayor sea la masa irradiada, o sea, mientras mayor sea la densidad, espesor y contenido de humedad de la pieza de madera, mayor será la absorción. Lo que significa que, para determinar la densidad por radiación se debe conocer el espesor y el contenido de humedad de la madera.

Determinación de nudosidades

Los nudos pueden ser determinados por radiación o a través del registro óptico de las cuatro superficies de la pieza de madera, por medio del escaneo con video cámaras o escáneres láser.

En cuanto a la radiación, los nudos son determinados debido a que la densidad de las especies coníferas, en promedio, es mayor que la de la madera sin nudos, por lo cual absorben más radiación y puede ser detectado su tamaño y ubicación en una imagen de rayos x, a través de niveles de grises. (Figura 2-4).

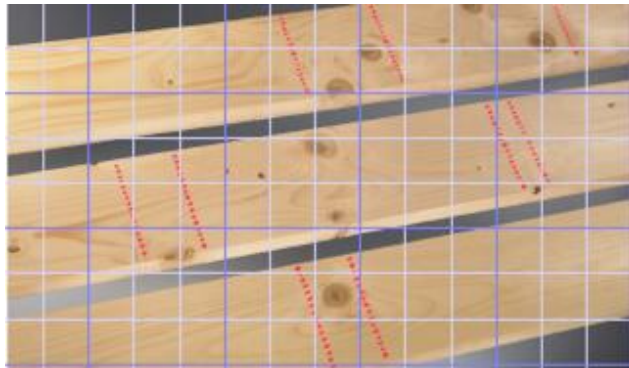
Figura 2-4: Método por radiación.



Referencia: (Glos, 2004)

Por medio de una estación de marcado con un escáner acoplado a un sistema de sierras, se marcan y cortan los sectores que se deben eliminar en la pieza de madera. (Figura 2-5)

Figura 2-5: Madera ya marcada.



Referencia: (Glos, 2004)

Determinación de inclinación de la fibra

La inclinación de la fibra es detectada por medio de microondas.

Determinación de defectos superficiales

Los defectos superficiales en tres dimensiones, tales como agujeros y aristas faltantes, se detectan a través de un sistema láser. Por medio de una mayor resolución, tanto en dirección longitudinal como transversal, es posible detectar defectos cromáticos, grietas y agujeros de insectos.

Máquina clasificadora

La máquina clasificadora incorpora todos estos conceptos y entrega el grado de madera de acuerdo a su módulo de elasticidad, nudosidades, inclinación de la fibra y defectos superficiales.

Figura 2-6: Máquina EasyScan que realiza la clasificación de la madera.



Referencia: (Weinig, 2016)

2.6.3 Comparación propiedades mecánicas entre láminas clasificadas visual y mecánicamente.

En la Tabla 2-5 se presentan las tensiones admisibles para los grados estructurales visuales: Grado A y Grado B. Por otra parte, en la Tabla 2-4 se presentan las tensiones admisibles para los grados estructurales mecánicos: MGP12 y MGP 10.

Tabla 2-5: Tensiones admisibles grados visuales.

Grado Estructural	Tensiones admisibles de						Módulo de Elasticidad Ef
	Flexión Ff	Compr. par. Fcp	Tracción par. Ftp	Compr. norm. Fcn	Tracción norm. Ftn	Cizalle Fcz	
	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	
A	9,3	9,5	5,6	2,5	-	1,1	10700
B	7,2	5,4	3,1	2,5	-	1,1	8000

Referencia: NCh 2165

Tabla 2-4: Tensiones admisibles grados MGP.

Grado Estructural	Tensiones admisibles de						Módulo de Elasticidad Ef
	Flexión Ff	Compr. par. Fcp	Tracción par. Ftp	Compr. norm. Fcn	Tracción norm. Ftn	Cizalle Fcz	
	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	
MGP12	13,5	15	6,0	2,5	-	1,3	12700
MGP10	8,4	10	4,0	2,5	-	1,3	10000

Referencia: NCh 2165

La comparación entre las cuatro calidades se presenta en la Tabla 2-6, donde se toma como referencia las calidades visuales. Se observa que los incrementos en resistencia a flexión de una lámina Grado A a Grado MGP 12 son de 45% y los de Grado A a MGP 10 son de -10%. En cambio en los módulos de elasticidad se aprecia que de Grado A a MGP 12 es de 19% y de Grado A a MGP 10 es de -7%.

Tabla 2-6: Comparación calidades, se presentan los incrementos con las calidades visuales como referencia.

Grado Estructural	Tensiones admisibles de						Módulo de Elasticidad Ef
	Flexión Ff	Compr. par. Fcp	Tracción par. Ftp	Compr. norm. Fcn	Tracción norm. Ftn	Cizalle Fcz	
	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
A->12	45%	58%	7%	0%	-	18%	19%
A->10	-10%	5%	-29%	0%	-	18%	-7%
B->12	88%	178%	94%	0%	-	18%	59%
B->10	17%	85%	29%	0%	-	18%	25%
B- > A	29%	76%	81%	0%	-	0%	34%
10->12	61%	50%	50%	0%	-	0%	27%

2.7 Marco teórico

A continuación se presentan definiciones y conceptos claves para familiarizar al lector con lo estudiado en este trabajo de título.

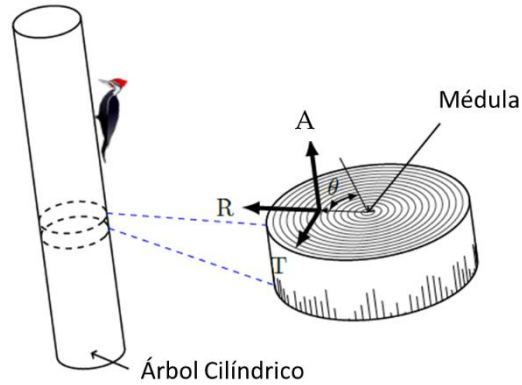
2.7.1 Propiedades de la madera

Inclinación de la fibra

Un tronco de madera se puede analizar como si fuese un cilindro, con tres ejes principales: axial, radial y tangencial (Figura 2-7); el cual desde una mirada micro, se asemeja a un paquete de tubos adosados lateralmente unos a otros. Lo anterior entrega características anisotrópicas a las propiedades resistentes de la madera, esto significa que, la resistencia que ofrece el material a cada uno de los esfuerzos aplicados depende de la dirección en que estos sean realizados.

En cuanto a la comparación entre resistencias, se sigue mayormente la siguiente regla: la resistencia en el eje axial es siempre mayor que la resistencia a los ejes radial y tangencial (Argüelles & Arriaga, 2000).

Figura 2-7: Esquematzación ejes axial (A), radial (R) y tangencial (T).



Referencia: (Tapia. 2015)

Nudosidades

Las nudosidades corresponden al remanente de las ramas que crecieron en el tronco del árbol, las cuales se desarrollan a partir del centro de los círculos anuales de crecimiento. Esto crea singularidades en la estructura homogénea del tronco y causa que la fibra de la madera rodee los nudos, debilitando su resistencia. Es por esta razón que, en la fabricación de MLE se eliminan los nudos más problemáticos de las láminas.

Figura 2-8: Nudo e inclinación de la fibra.



Láminas y uniones endentadas

Las láminas corresponden a piezas de madera aserrada de sección rectangular constante, comúnmente tienen las mismas dimensiones de ancho, espesor y alto. Sólo el largo presenta variación.

Las piezas de madera que forman una lámina deben ser de características mecánicas similares ya que así la lámina formada tenga una resistencia homogénea.

Los láminas se unen permitiendo la obtención de un producto de dimensiones mayores, en el cual, la unión de las caras en dirección longitudinal se realiza por medio de una unión endentada. Así, gracias a un sistema de dientes entrelazados y al adhesivo utilizado en la interfaz, se logra satisfacer el largo requerido. Las uniones de las otras caras, se realizan mediante un adhesivo, con uniones de tope, es decir, uniones de bordes sin realizar cortes. (González, et al., 2014)

2.7.2 Conceptos claves

Valor característico asociado al percentil del 5%.

El valor característico asociado al percentil del 5% está definido de acuerdo a la palabra "característico" y "percentil del 5%", la primera hace ilusión a que caracteriza una serie de datos tomando en cuenta conceptos estadísticos tales como promedio, número de observaciones o desviación estándar. El segundo término "percentil del 5%" se refiere a que en el 95% (100% - 5%) de los casos se obtendrán valores que estarán por sobre el valor característico. Este valor se utiliza para comparar resistencias (Módulo de Rotura) de las series de datos y está calculado en el Apéndice A.

Valor característico asociado al promedio

El valor característico asociado al promedio también caracteriza cada serie de datos, pero no toma en cuenta factores como la desviación estándar. Se utiliza para comparar la rigidez (Módulo de Elasticidad) de las series.

2.8 Revisión bibliográfica

Internacionalmente la MLE ha sido ampliamente estudiada y utilizada, mayoritariamente en países desarrollados del norte de Europa, Norteamérica y Oceanía.

Las características más icónicas de la madera y de la MLE se resumen en las siguientes:

- Las principales propiedades mecánicas de la madera son: su resistencia, dureza, rigidez y densidad. (González, et al., 2014)
- La resistencia de un madero suele estar relacionada con su densidad y su módulo de elasticidad. (Sandoz, 1996).
- El módulo de elasticidad también se vincula estrechamente con la rigidez. (González, et al., 2014)
- Investigaciones más detalladas, indican que el módulo de elasticidad predice de mejor manera la resistencia, siendo incluso más preciso que la densidad o las nudosidades (Colling, 1995).
- En cuanto a resistencias, la madera tiene una alta resistencia a compresión, baja resistencia a tracción y moderada resistencia al corte – cizalle (González, et al., 2014). La resistencia, por lo demás, depende de la dirección de la carga en comparación con la dirección de la fibra. Se tiene entonces, un gran juego de resistencias dependiendo del tipo y dirección de la sollicitación. (Tabla 2-5 y Tabla 2-4)

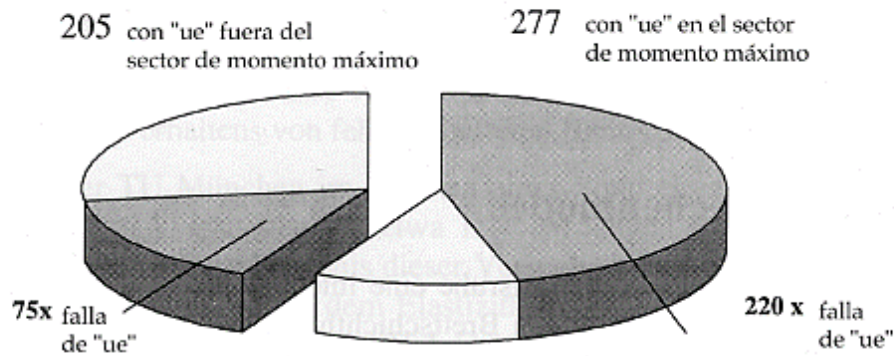
A continuación se presentan las conclusiones principales de autores internacionales más destacados del tema.

2.8.1 Colling

En el Gráfico 2-1 se aprecian los resultados de ensayos de flexión que se realizaron a vigas de MLE, en la cual, se observan dos posibles ubicaciones para tener una unión endentada: en el sector de momento máximo y fuera del sector de momento máximo. En la primera situación, cerca del 80% de la falla es causada por la existencia de la unión endentada. Y en la segunda, al ubicarse la unión endentada ("ue") fuera de la zona más solicitada, se tiene que un 37% de la fallas fueron consecuencia de la destrucción de la unión.

Gráfico 2-1: Riesgo de falla en la unión endentada.

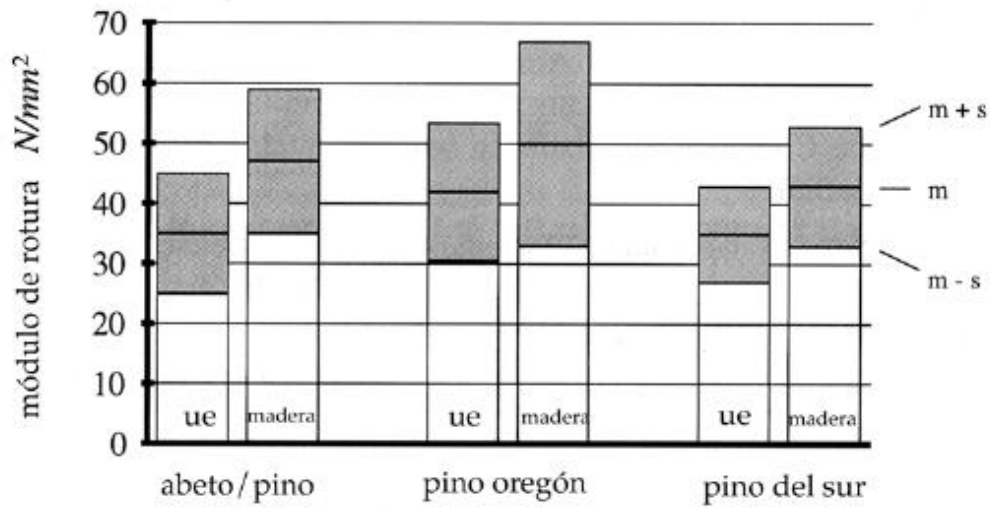
482 vigas con "ue" en la lámina exterior



Referencia: (Colling, 1995).

Para el Gráfico 2-2, se presentan los resultados de ensayos a flexión de tres especies madereras, separados de acuerdo al mecanismo de falla: en la unión endentada (ue) o falla en la madera.

Gráfico 2-2: Ensayos de flexión según el mecanismo de falla.



Referencia: (Colling, 1995).

El Gráfico 2-2 desagrega los resultados por especie maderera y tipo de falla, apreciándose que la unión dentada conduce a resistencias claramente menores que las correspondientes a las fallas originadas en la madera.

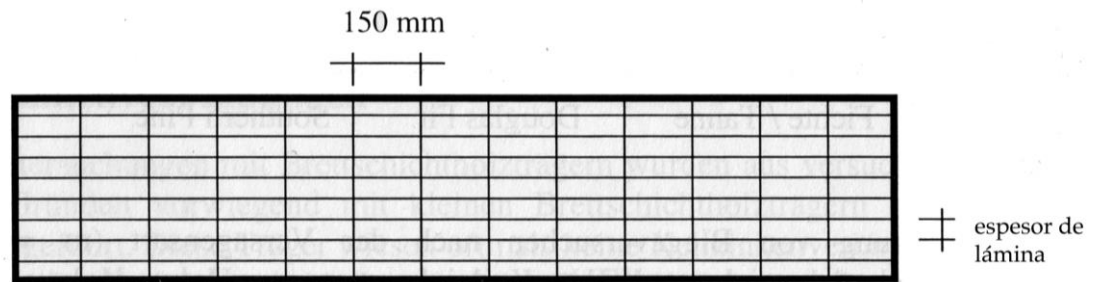
Estimación de propiedades mecánicas

Con el propósito de sobrepasar las restricciones financieras, implícitas de un amplio programa de ensayos con vigas de tamaño comercial, en la Universidad Federicana de Karlsruhe se desarrolló una modelación matemática del comportamiento de piezas de MLE. La cual permitía analizar el efecto de los principales parámetros relevantes sobre la resistencia. Y estaba basada en el método de elementos finitos, al usar como información, las características de la producción de la industria de MLE alemana.

El así llamado “Modelo de Cálculo de Karlsruhe” hizo posible simular una gran cantidad de ensayos de vigas en el computador, corroborándose sus resultados por medio de una cantidad reducida de ensayos de laboratorio.

En la modelación las vigas de MLE, se subdividieron estas, en elementos de largo 150 [mm], y con un espesor correspondiente al de las tablas usadas para la producción de láminas, tal como se presenta esquemáticamente en la Figura 2-9.

Figura 2-9: Esquema modelo viga.



modelación de vigas (elementos finitos)

Referencia: (Colling, 1995).

Por otra parte, para asignar a cada elemento propiedades físicas y mecánicas, en la Universidad Técnica de Munich, se implementó un programa experimental centrado en la caracterización de tablas utilizadas para la fabricación de láminas (ensayos de tracción y compresión con trozos de largo 150 mm (HEIMESHOFF y GLOS, 1980). Donde se consideró el tamaño, frecuencia de los nudos, densidad, módulo de elasticidad y largo, información que permite estimar la frecuencia posicional de las uniones dentadas. Con los resultados se obtuvieron regresiones matemáticas entre el módulo de elasticidad y la resistencia, y propiedades tales como densidad y nudosidades.

Además en Karlsruhe, se estudió la resistencia de las uniones dentadas en función de los parámetros de influencia relevantes sobre la resistencia, recurriéndose a regresiones analíticas para asignar el módulo de elasticidad y resistencia a cada elemento de la viga de MLE simulada.

El modelo se verificó por medio de ensayos dirigidos. Las diferencias apreciadas entre las capacidades resistentes calculadas y las obtenidas experimentalmente ascendieron a menos de 10%, lo que puede estimarse como satisfactorio.

Por medio de las simulaciones se pudo reafirmar que:

- La resistencia de vigas de MLE depende de las resistencias de tracción de las tablas y de las uniones dentadas.

- En el mecanismo de rotura de la MLE, las vigas tratan de desligarse lo antes posible de la sollicitación, buscando la más débil de las potenciales zonas de rotura. Ya sea, a un sector de tabla con presencia de nudos o una unión dentada. En consecuencia, **la MLE no puede ser más buena que el más débil de los dos parámetros de influencia, madera y unión dentada.** Por lo que el mejoramiento de la resistencia a través de una mayor exigencia cualitativa de la madera sólo tiene sentido si al mismo tiempo se producen uniones endentadas de alta calidad.

Significancia de la clasificación mecánica

Heimeshoff y Glos (1980) concluyeron que la resistencia de cortes de tablas queda determinada esencialmente por el tamaño de los nudos, la densidad, y especialmente por el módulo de elasticidad.

Otros factores se descartaron por tener un efecto más atenuado o porque desde el punto de vista de una clasificación visual resultan difíciles de controlar.

Ehlbeck, Colling y Wenz (1989), por su parte, concluyen que la resistencia de una unión dentada depende de la geometría de los dientes (perfil), la densidad, y el módulo de elasticidad de las tablas empalmadas. Pero también de factores inherentes al proceso productivo tales como el filo de la fresadora, la "vejez" del adhesivo, el nivel de presión aplicado y las condiciones ambientales en el recinto de producción.

De los estudios citados se concluye que, por medio de la densidad y el módulo de elasticidad de las tablas, es posible influir simultáneamente sobre la resistencia de las tablas y las uniones dentadas. Lamentablemente, ni la densidad ni el módulo de elasticidad, pueden ser cuantificados visualmente, requiriéndose para esto equipos especiales, que son propios de una clasificación mecánica.

Para enfatizar la importancia de la clasificación mecánica se desarrollaron series experimentales adicionales con vigas de MLE y con empalmes dentados.

Ensayos con vigas de MLE

El Gráfico 2-3 presenta un estudio donde se realizaron seis líneas experimentales, cada una con siete vigas. Las exigencias para cada línea experimental se presentan en la Tabla 2-7.

Con RAN se refiere a la Razón de Área Nudosa, índice relacionado con los nudos de la sección. Donde mientras mayor sea su valor, mayor será la participación de estos nudos en la disminución de la resistencia.

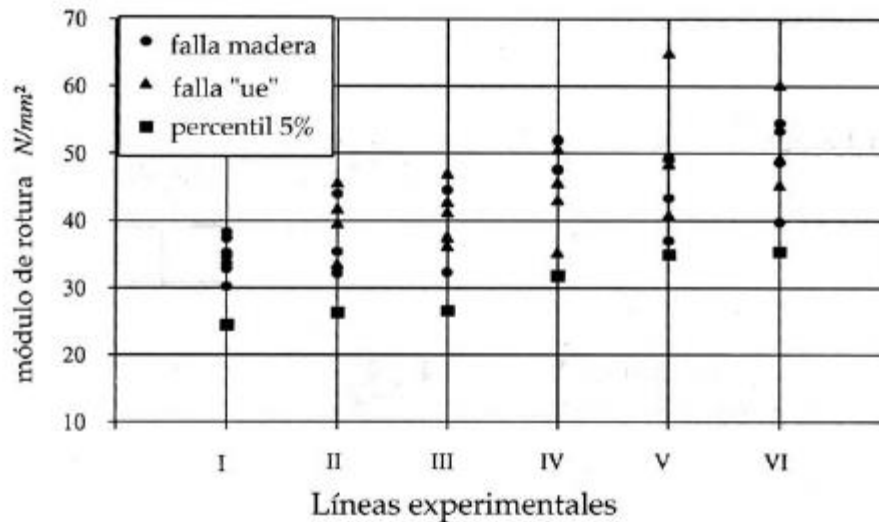
- Para las líneas I, II y III se tienen exigencias visuales.
- Para las líneas IV y V, se tienen clasificaciones de propiedades mecánicas.
- Finalmente para la línea VI se tiene una clasificación por parámetros visuales y mecánicos.

Tabla 2-7: Exigencias sobre las propiedades de las láminas

Línea exp.	exigencias
I	$0,35 < RAN$
II	$0,20 < RAN < 0,35$
III	$RAN < 0,20$
IV	$500 \text{ kg/m}^3 < \rho$
V	$10\,000 \text{ N/mm}^2 < E$
VI	$15\,000 \text{ N/mm}^2 < E$ y $RAN < 0,20$

Referencia: (Colling, 1995).

Gráfico 2-3: Resultados experimentales flexión vigas para diferentes parámetros de clasificación mecánica.



Referencia: (Colling, 1995).

Como se aprecia en el Gráfico 2-3, las líneas con clasificación visual obtienen valores cada vez mayores de resistencia (módulo de rotura), al limitar las nudosidades presentes en la viga. Incluso en la línea III, aunque no se aprecie significativamente.

Debido a que la cantidad de ensayos es pequeña, se realizaron 2000 simulaciones para cada línea de ensayo con el modelo de Cálculo de Karlsruhe. Lo que permitió obtener los valores rotulados en el Gráfico 2-3 como percentil 5%.

Los valores calculados para las resistencias y los resultados experimentales concordaron notablemente: las resistencias medias de cada una de las líneas experimentales, fueron predichas con una desviación no superior al 5 %. A la luz de estos valores, es posible reconocer en las líneas I, II y III que, los valores del percentil del 5% tienden asintóticamente a un valor límite. (Colling, 1995)

Para la línea I, en donde las nudosidades son de gran tamaño, todas las fallas se produjeron debido a ello.

A medida que se restringen los tamaños de los nudos en la madera, las fallas empiezan a producirse en las uniones endentadas, teniendo igual cantidad de fallas "madera" versus falla "ue" en la línea II. Llegando, en el caso III, a tener una mayoría de fallas ocasionadas por falla en madera que en uniones endentadas.

Para las líneas IV y V las resistencias asociadas al percentil del 5% son claramente mayores que para las líneas con clasificación visual. Se destaca que si se condiciona el módulo de elasticidad mínimo a 10000 [N/mm²] resulta más beneficioso que si se condiciona a una densidad mínima de 500 [kg/m³].

Además, en la línea IV, con el aumento de densidad, se incrementa la resistencia, tanto para fallas en madera como para fallas en uniones endentadas. Concluyéndose así, que la densidad afecta a ambos tipos de fallas.

El caso V es similar al caso IV, el aumento del módulo de elasticidad afecta tanto las fallas en madera como las fallas en uniones endentadas, pero se diferencia en que el incremento percibido es mayor, tanto en los resultados individuales como en los resultados del percentil del 5%.

Finalmente en la línea VI, se aprecia que los condicionantes en el módulo de elasticidad mínimo y en el RAN mínimo, ocasionan resistencias mayores en comparación con la línea III, destacándose que tienen igual RAN mínimo. En cambio, si comparamos esta línea con las correspondientes a las de clasificaciones mecánicas, se observa una tendencia asintótica de los percentiles del 5% de la resistencia, ya que se tienen aumentos de resistencia reducidos versus las líneas IV y V.

Si se comparan los valores de las resistencias características de MLE fabricada con láminas clasificadas visualmente (Líneas I - III) con los fabricados con láminas clasificadas mecánicamente (Líneas IV-VI), es posible reconocer que por medio de la clasificación mecánica existe un potencial de incremento en resistencia de **al menos un 30 %**. (Colling, 1995)

Con el propósito de estimar la influencia de este tipo de clasificación sobre la capacidad resistente de las uniones dentadas, se realizaron ensayos consistentes de tres líneas experimentales en la que se impusieron las exigencias indicadas en Tabla 2-8 sobre el módulo de elasticidad de las tablas empalmadas.

Tabla 2-8: Exigencias sobre las propiedades de la madera de las tablas. E en MPa.

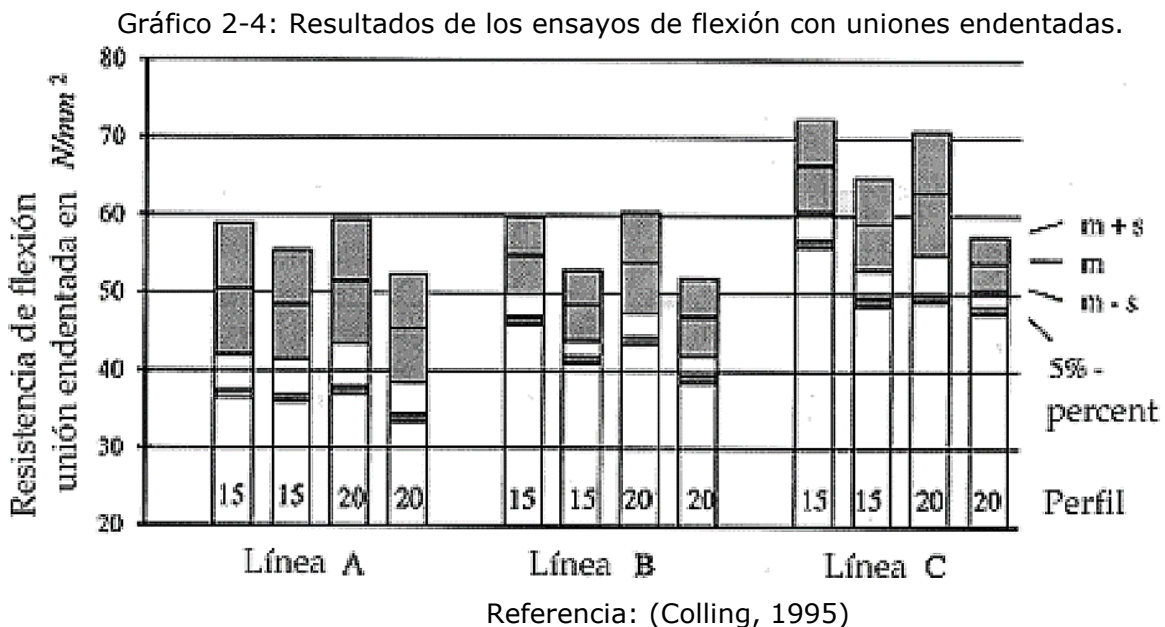
Línea	exigencia
A	ninguna
B	$11.500 < E < 13.500$
C	$15.000 < E$

Referencia: (Colling, 1995)

- Línea A: uniones endentadas fabricadas con tablas seleccionadas al azar, reflejo de la práctica habitual en las fábricas alemanas de MLE.
- Línea B: uso exclusivamente de tablas con módulo de elasticidad entre 11500 y 13500 MPa. El valor promedio en torno a 12500 MPa es similar al de las probetas de la Línea A, pero con menor dispersión de valores producto de la eliminación de las tablas con módulos de elasticidad demasiado altos o bajos.
- Línea C: exigió un módulo de elasticidad de 15000 MPa correspondiente a piezas de madera de alta calidad estructural.

Para cada línea experimental se ensayaron dos largos de dentado (perfiles de 15 mm y de 20 mm) provenientes de dos fábricas distintas. De cada empresa se seleccionaron en cada caso, 60 probetas ensayándose de a mitades en tracción y en flexión.

El Gráfico 2-4 visualiza los resultados experimentales. Las regiones comprenden los rangos del valor promedio $m \pm$ la desviación estándar s , que involucran aproximadamente los 2/3 de los valores experimentales. La franja inferior corresponde al percentil del 5 %.



A continuación se resumen los resultados más importantes:

- Línea A: la resistencia de flexión media ascendió a aproximadamente 50 MPa para ambos largos de perfil. La resistencia característica fluctúa en torno a 36 MPa.
- Línea B: la resistencia de flexión media se ubica también en torno a los 50 MPa, similar a la de la Línea A. En cambio el percentil del 5% queda claramente por sobre el correspondiente a la Línea A. La causa de esto reside en la reducción de la banda de dispersión de valores que se alcanza con ayuda de la clasificación mecánica.
- Línea C: los resultados resaltan aún más la importancia de la clasificación mecánica. El valor medio de la resistencia del orden de 60 MPa y el percentil del 5% en torno a 50 MPa condiciona un incremento cercano al 40 % para la resistencia característica de flexión con respecto a la correspondiente a la clasificación visual (Línea A). Tipo de clasificación tradicionalmente aplicada en la producción de MLE .

Los resultados de las líneas B y C muestran que la mejor capacidad resistente, del perfil dentado de 15 mm, recién se aprecia al mejorarse las propiedades de la madera.

Finalmente, sobre la base de los estudios descritos en esta sección es posible establecer las siguientes conclusiones:

- En consideración a la relevante importancia de las uniones dentadas sobre la resistencia resulta necesario imponer exigencias mínimas sobre su capacidad resistente.
- La fabricación de MLE de alta calidad resulta posible sólo con la ayuda de una clasificación mecánica de la madera sobre la base de la densidad y/o del módulo de elasticidad, y es la única forma de mejorar la resistencia de los dos factores de influencia: tablas y uniones dentadas.

Efecto laminación

Los primeros estudios de Francis Colling demostraban que la capacidad resistente de vigas de MLE eran claramente mayor que la resistencia de las láminas que la componían, comportamiento que es conocido como "efecto laminación".

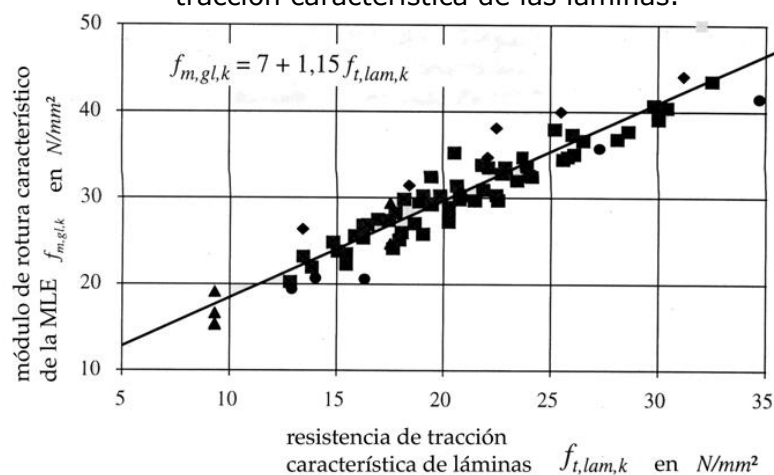
En base a ensayos disponibles y a cálculos de simulación, se analizó este mejoramiento, tratando de identificar cuál de los factores individuales que caracterizan una viga tienen una mayor participación en la resistencia final de las ellas.

- **Falla sólo en madera**

Es así que, en primera instancia sólo se tomaron en cuenta fallas en la madera y no en uniones endentadas. En el Gráfico 2-5 se aprecia la relación del factor resistencia de tracción característica, $f_{t,lam,k}$, de las láminas versus la resistencia de flexión característica de las vigas de MLE (*glulam*), $f_{m,gl,k}$, cuya expresión se encuentra en la Ecuación (2-2).

$$f_{m,gl,k} = 7 + 1.15 * f_{t,lam,k} \quad (2-2)$$

Gráfico 2-5: Resistencia de flexión característica de vigas de MLE en función de la resistencia a tracción característica de las láminas.



Referencia: (Colling, 1995).

- **Falla sólo en unión endentada**

Por otro lado, gracias a simulaciones con ayuda del Modelo de Cálculo de Karlsruhe se eliminó la falla de madera como origen de la rotura, teniéndose así, sólo fallas producidas en uniones endentadas. Así se encontró la siguiente relación, Ecuación (2-3), entre la resistencia a flexión característica, $f_{m,gl,k}$, de una viga de altura 300 mm y la resistencia de tracción característica de una unión endentada, $f_{t,j,k}$.

$$f_{m,gl,k}(H = 300mm) \approx 1.2 * f_{t,j,k} \quad (2-3)$$

Incorporando la fórmula del factor de modificación por altura del Eurocódigo 5 para una viga de altura 600 mm resulta la Ecuación (2-4).

$$f_{m,gl,k}(H = 600mm) \approx 1.2 * \left(\frac{300}{600}\right)^{0.2} * f_{t,j,k} = 1.05 * f_{t,j,k} \quad (2-4)$$

Considerando las dificultades de determinar la resistencia a tracción de las uniones endentadas en el proceso de control de calidad, se decidió estimarla mediante un ensayo a flexión de las uniones endentadas. La cual es más sencilla de instrumentalizar.

Gracias a numerosos estudios (Ehlbeck y Colling, 1992), se estableció la siguiente relación entre la resistencia a tracción característica, $f_{t,j,k}$, y la resistencia de flexión característica, $f_{m,j,k}$, de uniones endentadas.

$$f_{t,j,k} \approx 0.7 * f_{m,j,k} \quad (2-5)$$

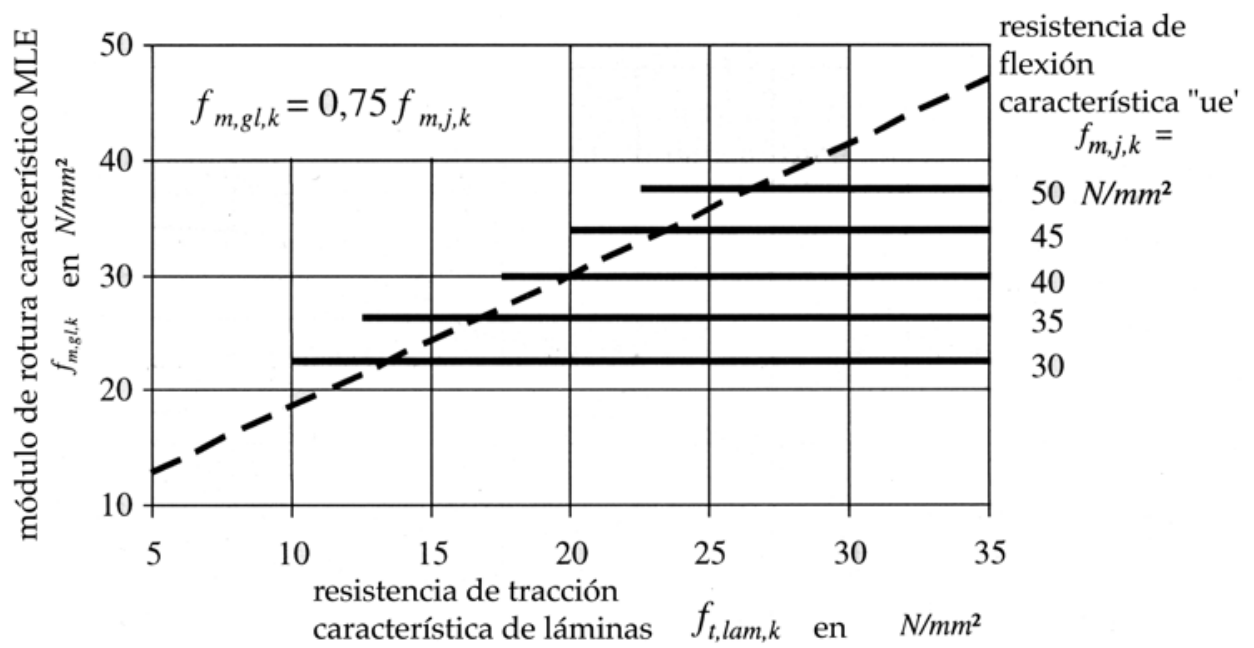
Relación que además, gracias a los ensayos, se demostró que regía independientemente de la calidad de las láminas a usar.

Reemplazando (2-5) en (2-4) se obtiene la expresión, Ecuación (2-6), para la resistencia a flexión característica de la viga de MLE, $f_{m,gl,k}$, y la resistencia a flexión característica de la unión endentada, $f_{m,j,k}$.

$$f_{m,gl,k} \approx 1.05 * 0.7 * f_{m,j,k} = 0.75 * f_{m,j,k} \quad (2-6)$$

Dependencia que se muestra en el gráfico 2-6.

Gráfico 2-6: Resistencia a flexión característica viga MLE en función de las resistencias de flexión características de las uniones endentadas.



Referencia: (Colling, 1995).

El gráfico anterior corresponde a una superposición de la influencia de la variable madera (Gráfico 2-5) y de la variable unión endentada en la resistencia a flexión de la viga de MLE.

A medida que se aumenta la resistencia a tracción de las láminas de madera, se incrementará la resistencia de la viga hasta el punto del límite impuesto por la influencia de la unión endentada. Límite, que sólo puede ser sobrepasado gracias al aumento de la calidad de las uniones endentadas.

La resistencia de las uniones endentadas difiere de fábrica en fábrica (factores dependientes del proceso productivo) y que apenas se las considera durante el proceso de diseño. Es por ello que se convino no emplear la Ecuación (2-6) para la estimación de la resistencia de MLE, sino que para la definición de exigencias mínimas sobre la resistencia de las uniones endentadas.

En conclusión:

- El calculista especifica el Grado Estructural de las láminas con las que se debe fabricar la viga de MLE. Sobre la base de la condición (2-6) queda establecido al mismo tiempo el valor objetivo para la resistencia de flexión característica de la viga de MLE.
- Esta resistencia objetivo se alcanza en todo caso, sólo cuando de acuerdo con (2-6) las uniones endentadas satisfacen la exigencia:

$$f_{m,j,k} \geq 1,35 \cdot f_{m,gl,k} \quad (2-7)$$

Esta exigencia, que constituyó el origen de muchas discusiones controversiales entre los productores de MLE en Alemania, se incorporó en forma modificada por la normativa europea de MLE (EN 1194:1999: Madera laminada encolada –Clases Resistentes y derivación de valores característicos) en la siguiente forma.

Las uniones dentadas en todas las láminas deben satisfacer al menos una de las siguientes 2 condiciones:

$$f_{t,j,k} \geq 5 + f_{t,0,l,k} \quad (2-8)$$

$$f_{m,j,k} \geq 8 + 1,4 \cdot f_{t,0,l,k} \quad (2-9)$$

Donde:

$f_{t,j,k}$: Resistencia característica de tracción del empalme dentado determinada de acuerdo a EN 408, con una distancia libre entre mordazas de al menos 200 [mm].

$f_{m,j,k}$: Resistencia característica a flexión de la unión endentada ensayado en forma abatida de acuerdo con la norma EN 386.

2.8.2 Blass

Estudios experimentales realizados en la Universidad de Karlsruhe a fines de la década pasada (Blass et al.) con vigas de MLE de abeto de altura 600 mm, correspondientes a las clases estructurales GL32c y GL36c según EN 1994:1999, condicionaron resistencias características (valores asociados al percentil del 5%) menores en un 15% y 25% respectivamente a los 32 MPa y 36 MPa establecidos en la norma.

Estos resultados pusieron en tela de juicio las expresiones desarrolladas por Colling como exigencias para las resistencias de las tablas y de los empalmes dentados. Como salida al problema se completó la fase experimental con 5400 ensayos virtuales que consideraron 9 criterios distintos de clasificación de madera. Tres de ellos visuales, dos combinando densidades normales características (450 y 475 [kg/m³]), con una RAN $\leq 0,35$, y cuatro combinando el módulo de elasticidad dinámico (14000, 15000 y 16000 MPa), con una RAN $\leq 0,50$.

La base numérica para los modelos de resistencia consistieron de los siguientes tres valores resistentes:

- La resistencia característica de flexión de las vigas ensayadas virtualmente.
- La resistencia característica de tracción de la madera usada para la producción de láminas determinada según EN 408 para los distintos resultados de clasificación.
- La resistencia característica de tracción de los empalmes dentados comprendida entre 20 y 40 MPa incrementada en rangos de 2,5 MPa.

Con el propósito de especificar adicionalmente los modelos resistentes en función de la resistencia característica de flexión de los empalmes dentados, se reemplazó la expresión de la resistencia de tracción del empalme dentado, referido a una longitud libre de probeta de 150 mm ($f_{t,j,k,l=150\text{ mm}}$), por la resistencia característica de flexión de la unión dentada.

$$f_{m,j,k} \approx 1,4 \cdot f_{t,j,k,l=150\text{ mm}} \quad (2-10)$$

Igualando las expresiones de las dos exigencias establecidas en EN 1194 sobre la resistencia de los empalmes dentados, es posible despejar.

$$f_{m,j,k} = 1 + 1,4 \cdot f_{t,j,k,l=200\text{ mm}} = 1,4 \cdot f_{t,j,k,l=200\text{ mm}} \quad (2-11)$$

La concordancia entre las expresiones (2-10) y (2-11) muestra que los modelos resistentes que dependen de la resistencia de tracción del empalme dentado también resultan válidos para una resistencia de tracción característica de tracción de un empalme dentado, determinada de acuerdo con EN 408 con una longitud libre de probeta de 200 mm.

Un descubrimiento importante de Blass et al. (2009) es que un modelo resistente universal, que cubra la totalidad de los criterios de clasificación, no es capaz de describir con suficiente precisión el efecto de laminación. Como consecuencia de esto, se especificaron dos modelos resistentes adecuados para cubrir dos métodos de clasificación, visual y mecánica, y cada uno con un efecto de laminación similar.

La fracción de fallas de dentados, $h_{j, grieta}$, constituye una variable dependiente importante para la determinación de una relación balanceada entre la resistencia de tracción de las tablas y la resistencia de flexión de las uniones dentadas.

Clasificación visual:

$$f_{m,g,k} = 3,454 + 0,9975 * f_{t,j,k} - 0,02113 * f_{t,j,k}^2 - 0,01632 * f_{t,l,k}^2 + 0,03582 * f_{t,j,k} * f_{t,l,k} \quad (2-12)$$

$$f_{m,g,k} = 3,454 + 0,7125 * f_{m,j,k} - 0,01078 * f_{m,j,k}^2 - 0,01632 * f_{t,l,k}^2 + 0,02558 * f_{m,j,k} * f_{t,l,k} \quad (2-13)$$

$$h_{j,grieta} \gg 93,5 - 2,35 * f_{m,j,k} + 2,29 * f_{t,l,k} \quad (2-14)$$

Clasificación mecánica:

$$f_{m,g,k} = -17,39 + 2,29 * f_{t,j,k} - 0,03223 * f_{t,j,k}^2 + 0,01144 * f_{t,j,k} * f_{t,l,k} \quad (2-15)$$

$$h_{j,grieta} \gg 131 - 2,4 * f_{m,j,k} + 0,873 * f_{t,l,k} \quad (2-16)$$

$$f_{m,g,k} = -17,39 + 1,636 * f_{m,j,k} - 0,01644 * f_{m,j,k}^2 + 0,008169 * f_{m,j,k} * f_{t,l,k} \quad (2-17)$$

Para simplificar la operatividad de la proposición, se sugiere recurrir a las Ecuaciones (2-12) y (2-13) para resistencias características de tracción de tablas de hasta 21 MPa. De no ser así, son aplicables las Ecuaciones (2-15) y (2-16).

El rango de validez de aplicación se puede resumir como:

Ecuaciones (2-12) y (2-13) para $13 \text{ MPa} \leq f_{t,l,k} \leq 21 \text{ MPa}$

Ecuaciones (2-15) y (2-16). para $22 \text{ MPa} \leq f_{t,l,k} \leq 35 \text{ MPa}$

Especificaciones en la norma EN 14080:2013-09

La norma EN 1194 fue reemplazada por un nuevo documento, la norma EN 14080:2013:09, que englobó un conjunto de normas relacionadas con la fabricación y control de calidad de madera laminada encolada, la definición de clases estructurales y de resistencias características de MLE.

Para el caso de la resistencia característica de flexión, la expresión se desvía considerablemente de la considerada en EN 1194, asimilándose algo a la proposición de Blass et Al. En el sentido que expresa la resistencia característica de flexión de las vigas de MLE, en función de las resistencia característica de tracción de las madera utilizada para producir láminas y la resistencia característica de flexión abatida de las uniones dentadas.

$$f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5 \cdot f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 \cdot \left(\frac{f_{m,j,k}}{1,4} - f_{t,0,l,k} + 6 \right)^{0,65} \quad (2-18)$$

Donde: $f_{t,0,j,k}$: Resistencia característica de tracción del empalme dentado determinada de acuerdo a EN 408, con una distancia libre entre mordazas de al menos 200 [mm].

$f_{m,j,k}$: Resistencia característica a flexión de la unión endentada ensayado en forma abatida de acuerdo con la norma EN 386.

$f_{m,g,k}$: Resistencia característica a flexión de la viga de MLE.

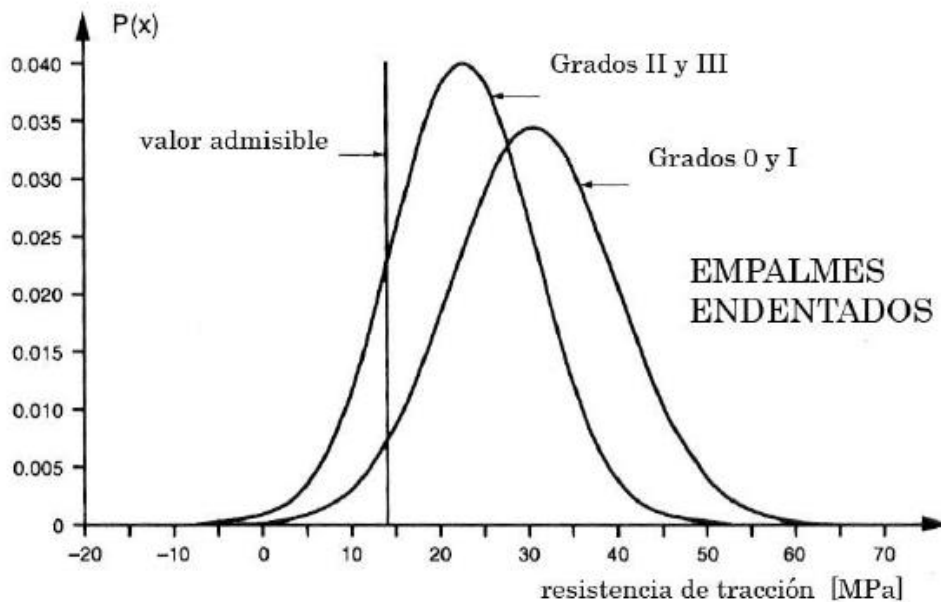
2.8.3 Sandoz

Los estudios anteriores a este autor indican que la resistencia a flexión de vigas de MLE está dada por dos parámetros:

- La calidad de la madera de las láminas.
- La calidad de la unión endentada.

Por lo cual, para estudiar el efecto de la calidad de la madera en el módulo de elasticidad y en el módulo de rotura en flexión es que se presenta el gráfico siguiente.

Gráfico 2-7: Resistencia a tracción probable de cuatro grados de calidad de la madera.



Referencia: (Sandoz, 1996)

Los grados que mostrados en el Gráfico 2-7, fueron clasificados mediante un equipo de medición ultrasónico que mide las propiedades de las piezas. A mayor velocidad ultrasónica, mayor será el módulo de elasticidad y mayor será el módulo de rotura a flexión de una pieza de madera aserrada.

Por ello, se realizaron ensayos para determinar el módulo de elasticidad y otros para determinar el módulo de rotura de piezas de MLE fabricadas a partir de piezas aserradas de calidad controlada.

Se ensayaron más de 90 vigas, de 6 a 12 m de largo, utilizando láminas de los Grados A y B. Con secciones transversales de 120/300 mm hasta 160/600 mm. Además se ensayaron aproximadamente 500 empalmes de láminas, a tracción y a flexión. Se consideró el uso de distintos perfiles de endentado, tipos de adhesivo y calidades de Madera. Finalmente se ensayan numerosas superficies de encolado en cizalle, tracción y compresión normal a la fibra (Sandoz, 1996).

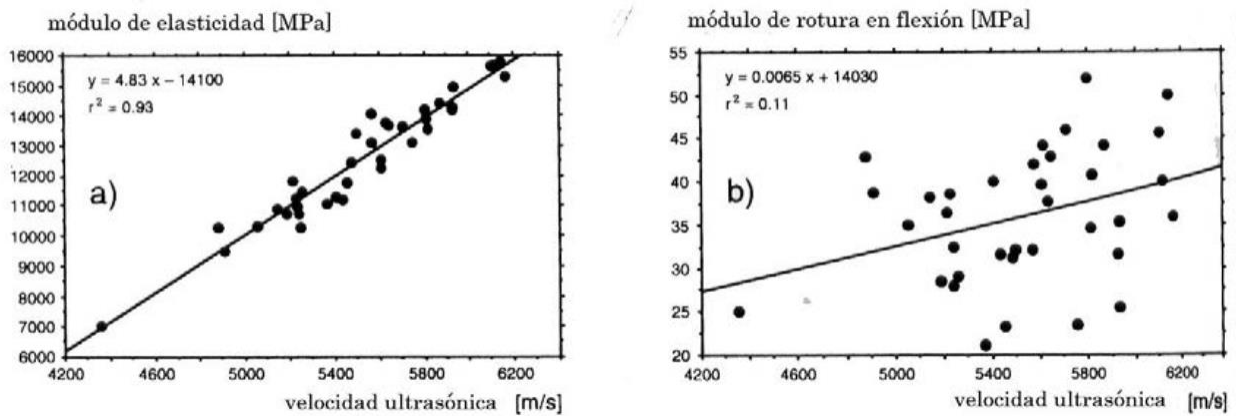
Los resultados se observan en la Gráfico 2-8, donde para el primer gráfico se aprecia que la calidad de la madera está directamente relacionada con el módulo de elasticidad, siguiendo una recta casi perfecta entre los datos.

En cambio, para el gráfico del lado derecho, los datos están suficientemente alejados como para concluir que la calidad de la madera por sí sola no predice suficientemente la resistencia del producto terminado.

Otro parámetro a tomar en cuenta, tal como se dijo al principio de este apartado, es la calidad de la unión endentada, que depende de varios factores de producción. Tales como la calidad de la fresadora, el adhesivo a usar, la presión de fraguado, el tiempo de fraguado, la manipulación en la fabricación o incluso la propia geometría del endentado.

Estas situaciones corresponden a todos los puntos del gráfico que se encuentran bajo la recta y que corresponden a roturas de las uniones endentadas.

Gráfico 2-8: Comparación ensayos del módulo de elasticidad y el módulo de rotura en flexión de una pieza de MLE, versus los resultados de velocidad ultrasónica promedio.



Referencia: (Sandoz, 1996)

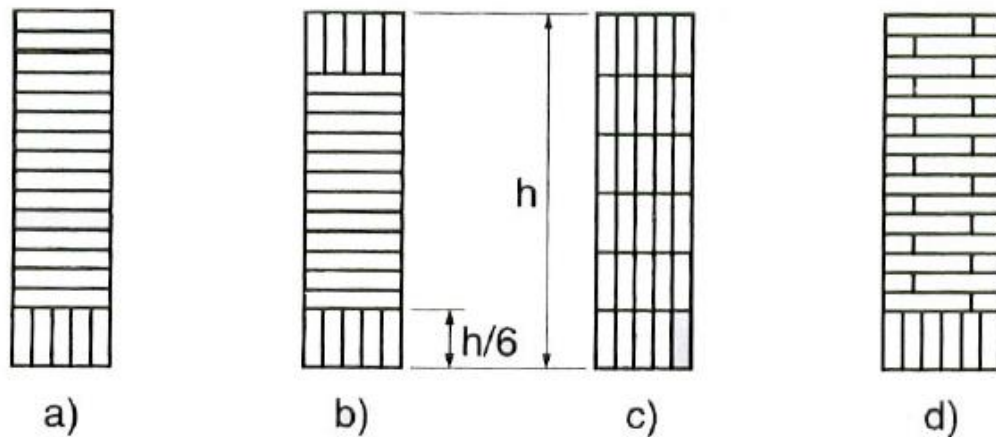
Debido a que la influencia de las uniones endentadas en la resistencia a flexión es alta, es necesario buscar otras alternativas a la ubicación y disposición de estas uniones, disminuyendo así su influencia en el producto terminado.

En vigas de MLE clásicas, las láminas se disponen uniando la cara inferior de una lámina con la cara superior de la siguiente, formando vigas de altura limitada sólo por diseño. Además, los esfuerzos de flexión máximos se producen en los extremos de las fibras superiores e inferiores de una viga, siendo las láminas flexo-traccionadas las más vulnerables a fallar.

Es por esto que, en la literatura se propone disponer las láminas inferiores de manera perpendicular a la dirección de la deformación por flexión, tal como se muestra en la Figura 2-10, de manera de tener varias láminas y con eso varias uniones endentadas en la zona más vulnerable y disminuir la influencia que pueda tener una única unión endentada, posiblemente deficiente.

El producto en donde las láminas se disponen siguiendo ubicaciones diferentes a la MLE clásica se conoce como Madera Laminada Multilaminar, o MBSH (siglas en alemán). Pero para efectos de este trabajo de título existen dos laminaciones: laminación horizontal y laminación vertical en zona flexotraccionada.

Figura 2-10: Distintas disposiciones para la MBSH.



Referencia: (Sandoz, 1996)

- Caso a) una montura multilaminar traccionada.
- Caso b) monturas multilaminares comprimida y traccionada.
- Caso c) monturas multilaminares en la totalidad de la sección.
- Caso d) montura multilaminar traccionada en viga con láminas encoladas de canto.

Si durante el ensayo de flexión, y como consecuencia de su debilidad, la unión endentada falla, las láminas vecinas actuarán como ayuda. Se aprecia el fenómeno de la redistribución de la sollicitación sobre las otras láminas, lo que podría designarse como un efecto de solidaridad. La viga misma no pierde altura estática y mantiene con ello su momento de inercia original, incrementándose únicamente las tensiones internas de la viga (Sandoz 1996).

Visión probabilística

Si se designa la resistencia de tracción de una de las láminas utilizadas por r_i , la resistencia promedio por \hat{x}_r y la desviación estándar por $\hat{\sigma}_r$.

$$f_N(r_i, \hat{x}_r, \hat{\sigma}_r) \quad \text{con} \quad r > 0 \quad (2-19)$$

La probabilidad de la resistencia de vigas de madera laminada multilaminar corresponde a una probabilidad matemática (valor promedio) $\hat{x}_{MBSH} \geq \hat{x}_r$ con una desviación estándar $\sigma_{MBSH} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}$, donde n corresponde a la cantidad de láminas verticales. Esta nueva relación queda descrita por:

$$f_N(MBSH_i, \hat{x}_{MBSH}, \hat{\sigma}/\sqrt{n}) \quad \text{con} \quad MBSH_i \geq 0 \quad (2-20)$$

Lo anterior explica, por ejemplo, el que un estrato de láminas verticales constituido por 4 láminas, condiciona en la viga laminada multilaminar una variabilidad equivalente a la mitad de la correspondiente de una viga de madera laminada tradicional, relación que es válida independientemente de la altura de la viga. Esto no sucede en MLE, donde el debilitamiento relativo al número de láminas se queda expresado como:

$$P(MBSH_i) = 1 - (1 - r_i)^\delta \quad (2-21)$$

Donde:

$P(MBSH_i)$: Probabilidad de rotura de una viga de madera laminada, en función de la distribución de resistencias de las láminas y la cantidad de láminas

δ : Cantidad de láminas traccionadas en condición de riesgo, bajo la hipótesis de un comportamiento de acuerdo con la teoría del eslabón más débil. Esta cantidad de láminas, depende del parámetro de fabricación h/e (altura de viga/espesor de lámina) y de la fracción de sección transversal en condición de riesgo.

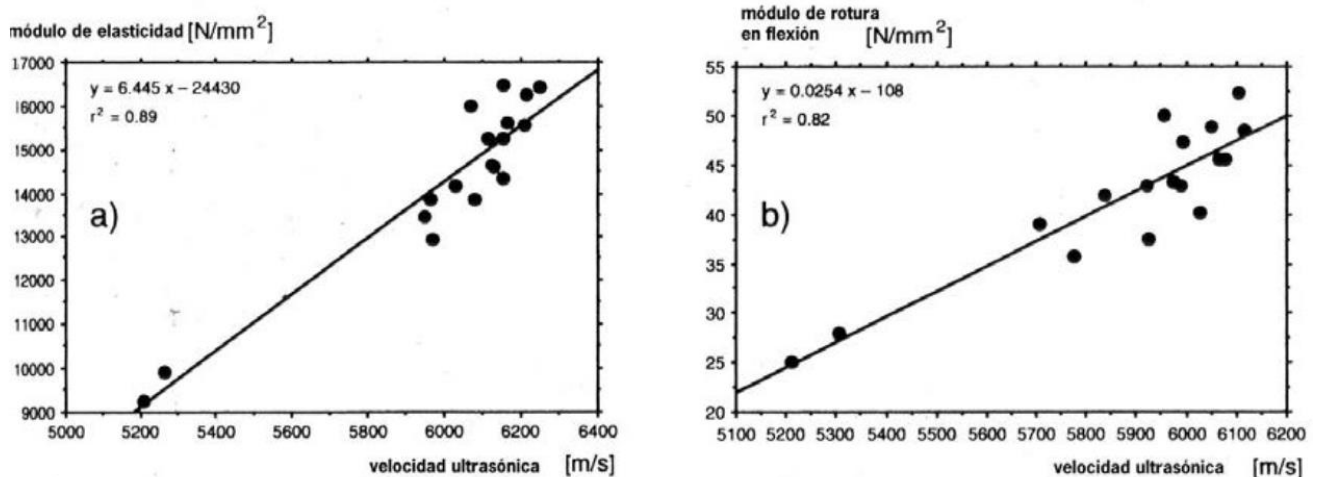
Resultados experimentales vigas MBSH

Para determinar si es que realmente la disposición de las láminas aumenta la resistencia de la viga en flexión, se ensayaron 18 vigas de dimensiones 120mm*300mm por 6000 mm de largo.

Los resultados se aprecian en los dos gráficos de la Figura 2-11, donde al igual que en los ensayos envigas de MLE el módulo de elasticidad presenta una fuerte relación con la calidad de la madera (gráfico de la izquierda).

En cambio, en el gráfico del lado derecho sí se aprecia una diferencia con los resultados de los ensayos con MLE, ya que la calidad de la madera se relaciona directamente con la resistencia de la viga de MBSH, teniéndose para cada valor de calidad de la madera un valor de resistencia a flexión. Esto se debe a que, para esta disposición de láminas, las uniones endentadas no tienen un papel tan relevante en la resistencia como en las vigas de MLE, sino que se puede utilizar todo el potencial resistente de la viga.

Figura 2-11: Comparación módulo de elasticidad y módulo de rotura en flexión versus resultados de velocidad ultrasónica promedio.

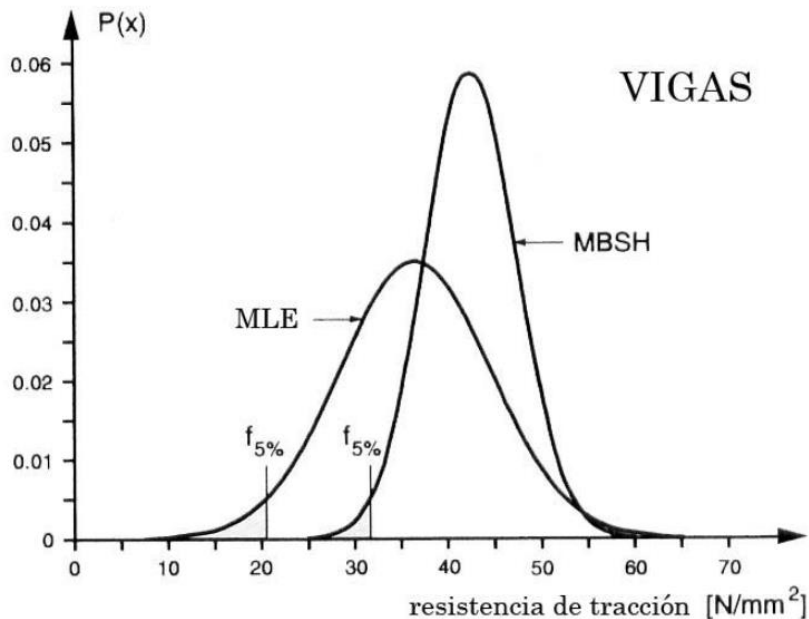


Referencia: (Sandoz, 1996)

Si se tiene presente que la MBSH se fabrica con láminas de calidad controlada correspondiente a la Clase europea C35 ó Ultrasónica 0 (con un percentil del 5 % mayor o igual que 35 MPa, módulo de elasticidad de 14000 MPa, para velocidades ultrasónicas mayores que 5.700 m/s), se obtiene también una distribución de MBSH cuyo percentil de 5% también resulta superior a 35 MPa.

En el Gráfico 2-9 se muestra esta distribución, que incorpora una comparación de los resultados de ensayos de la MBSH Clase A con los obtenidos con MLE clásica. Se aprecia que la clasificación posibilita la fabricación de MBSH con un módulo de elasticidad de 13.500 MPa (corresponde a la clase europea GL 32) o bien de 14.500 MPa (corresponde a la GL36), independientemente de las propiedades de los endentados en cuña del fabricante.

Gráfico 2-9: Comparación entre densidades estadísticas de resistencias de vigas de MLE y de vigas de MBSH fabricadas con grados estructurales superiores.



Referencia: (Sandoz, 1996)

Tabla 2-9: Valores característicos de MLE y MBSH en ensayos a flexión.

	Cantidad	Módulo de elasticidad		Resistencia				Valor de diseño		Factor de seguridad
		Prom.	Desv,est,	Prom.	Desv.est.	c.v.	P 5 %	Clase I	Clase II	
		MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	MPa	MPa	
MLE A	59	12.660	1.850	35.77	8.32	23.3	22.0	14	1	1.57 – 1.84
MBSH A	18	15.130	874	46.3	4.70	10.2	38,5	20		1.93

Referencia: (Sandoz, 1996)

En Tabla 2-9 se entregan los valores característicos de los productos de MLE y MBSH. Para la MLE los valores admisibles asociados a las Clases A y B determinan un ámbito de seguridad entre el percentil del 5% y el valor admisible adoptado en la práctica. Para MBSH evaluada en forma rigurosa al considerar un factor de seguridad promedio de 1,9 y un coeficiente de variación de aproximadamente 10 %, se obtiene ante el uso de láminas C35 una tensión admisible de flexión de 20 MPa. Esto es superior, entre un **40-60 %** más, a los actuales valores admisibles usados en Europa.

Conclusiones

La MBSH corresponde a un producto nuevo, que permite evitar el problema de las uniones endentadas ya que recurre a las propiedades resistentes de una montura, constituida de láminas dispuestas perpendicularmente a las láminas de la viga.

Esta característica, elimina el debilitamiento directo de un empalme endentado defectuoso, por medio de la distribución de la sollicitación sobre la lámina que falla hacia las láminas verticales vecinas. Con un mínimo de cuatro láminas verticales en la montura es posible alcanzar resistencias mayores, y especialmente una mayor homogeneidad para el material, dado que la montura multilaminada distribuye uniformemente las propiedades de las láminas.

Una ventaja adicional es que este producto no exhibe efectos de volumen negativos (efecto de altura de sección transversal), permitiendo la fabricación de vigas de espesor mayor. El comportamiento de la unión endentada de la montura multilaminar con la viga, resulta absolutamente satisfactoria. No se apreció ningún tipo de sectores débiles debido a tensiones de cizalle o de solicitaciones de tracción normal al plano de encolado.

Ante un incremento en los costos de producción entre 3 a 5% es posible obtener reducciones del volumen de madera en la estructura de 15 a 25% en relación a las vigas tradicionales.

2.8.4 Schickhofer

G. Schickenhofer en su presentación para la vigésima octava Jornadas de Perfeccionamiento de la Sociedad Suiza de Investigación en Madera en 1996, plantea en la introducción, que las imprecisiones inherentes a los métodos de clasificación visual, en lo relacionado con las propiedades resistentes y de rigidez de la madera, conducen a un aprovechamiento insuficiente del material. Donde contrasta esta situación con la del uso de métodos de clasificación especiales de naturaleza mecánica, que permiten una segregación dirigida de la madera en diferentes clases resistentes. Esta última opción que parece clara y simple requirió, sin embargo, de un complicado trayecto desde su conceptualización hasta la implementación práctica.

La formulación de la noción de una clasificación mecánica de la madera surge en Estados Unidos y se remonta al período 1958 a 1962. Las investigaciones relacionadas con la factibilidad técnica y económica se desarrollan entre 1963 y 1969, con una primera implementación práctica en el año 1970 para finalmente penetrar en el mercado como una real opción comercial el año 1977. La puesta en práctica de la idea, requirió en consecuencia, de un período de 19 años.

La llegada a Alemania y Austria de las primeras máquinas de clasificación y la autorización de su uso por parte de los organismos contralores de la construcción fue recién en el año 1996, requiriendo por lo tanto de otro período de 19 años. Con el propósito de acelerar la incorporación de este método, por parte de la industria maderera austriaca, y modificar las condiciones vigentes a fines del siglo pasado, se planificaron y desarrollaron dos proyectos.

El primero planteó como objetivo el desarrollo de componentes constructivos de MLE de alto rendimiento por medio de la incorporación de madera clasificada por resistencia en forma mecánica. Mientras que el segundo centró sus objetivos en los efectos de mejoramiento en vigas híbridas.

En los ensayos de la fase experimental, que tomo un período de 2 años, se utilizó para la fabricación, empalmes y vigas un volumen del orden de 150 metros cúbicos de madera aserrada.

La clasificación mecánica se llevó a cabo con un equipo que determina el módulo de elasticidad local de las tablas en forma continua cubriendo una luz de 700 mm y registra la densidad, el tamaño y ubicación de los nudos por medio de rayos X. El material se segregó en 3 Clases Estructurales de acuerdo con la norma DIN 4074/3/1996, adoptada también como norma austriaca.

En el contexto del primer proyecto se ensayaron láminas en tracción y flexión, empalmes dentados en tracción y vigas laminadas en flexión. En el segundo proyecto se volvieron a ensayar en tracción 168 láminas clasificadas después de una recalibración del equipo de clasificación y se agregó una serie experimental consistente al ensayo de 47 vigas híbridas que combinaban las calidades de láminas producidas

Las principales conclusiones estudio se pueden resumir en lo siguiente.

En relación a la clasificación mecánica de tablas.

La clasificación mecánica permite una clara segregación de clases estructurales escalonadas en las que el **coeficiente de variación de las resistencias correspondientes a cada clase varía entre 0,20 y 0,25**. Rango marcadamente inferior al apreciado en las clases estructurales resultantes de una clasificación visual, en los que el coeficiente de variación resulta del orden de 0,40.

En relación a los empalmes dentados de láminas.

Si el fabricante pretende producir piezas de alta capacidad resistente al incorporar madera clasificada mecánicamente, se debe incorporar un sistema de control de calidad riguroso y permanente en la producción de empalmes dentados.

En relación a los ensayos de vigas.

La comparación del módulo de elasticidad de piezas de "madera de construcción adecuada", con el módulo de elasticidad promedio de las series experimentales de vigas laminadas, permitió apreciar incrementos del orden del 70%.

La eficiencia del armado híbrido de vigas se apreció en la similitud de las resistencias obtenidas por dos series de vigas, fabricadas con los siguientes dos criterios:

En la primera, se dispuso de madera clasificada mecánicamente de la mejor clase estructural en los sextos extremos de la altura de la sección transversal, y madera clasificada visualmente en el sector central. Donde la diferencia de las resistencias características de tracción de las láminas de los bordes y del centro correspondió al 200%.

Mientras que en la segunda, el armado consideró para el sector central láminas de la clase inmediatamente inferior a la máxima, cuya diferencia en la resistencia característica de flexión era del orden del 50%.

Se concluye que es posible utilizar madera de alta capacidad resistente sólo en los sectores de borde, pudiendo usarse en el sector central madera correspondiente a grados visuales.

La conclusión final de los dos proyectos, es que si se desea producir en Austria componentes estructurales de madera laminada encolada, aceptados en las clases estructurales superiores de la normativa europea, resulta imprescindible una clasificación mecánica integral de la madera.

Capítulo 3 Experiencias Nacionales: Exigencias de armado y Evolución de Propiedades Mecánicas.

En este tercer capítulo, se presenta al lector las exigencias normativas o propias de la industria de MLE para la fabricación de vigas. Y corresponden a una combinación de las mejores prácticas que se utilizan actualmente en el país, de acuerdo a normas nacionales e internacionales. Además, se presenta una reseña de cómo ha evolucionado en Chile la derivación de propiedades de mecánicas de MLE.

3.1 Exigencias de armado en Chile

La normativa actual, NCh 2148 (INN, 2013), no entrega especificaciones detalladas para el armado de vigas, ya que se limita mayormente a establecer relación entre adhesivos y condiciones de servicio, ensayos para control de calidad rutinarios de adhesivos, tolerancias dimensionales, condiciones de fabricación de elementos de MLE estructural, entre otros.


En cambio, la versión anterior: NCH 2148 Of.89 (INN, 1989) sí establecía con mayor detalle criterios de fabricación específicos. Estos criterios, que la industria ha mantenido vigentes en sus procesos de producción, en combinación con prácticas internacionales, conforman lo siguiente.

3.1.1 Fabricación de los elementos estructurales

En la fabricación de las diferentes piezas estructurales según planos de cálculo, se deben considerar una serie de aspectos tales como:

Espaciamiento de uniones de extremo

El espaciamiento entre uniones endentadas se determina midiendo, según una dirección paralela a los ejes longitudinales de las láminas individuales.

- Se deben evitar las concentraciones de uniones en extremos longitudinales. Las láminas de elementos estructurales que quedarán sometidas a tracción y aquellas ubicadas en el **octavo exterior** de zonas traccionadas de elementos flexionados, deben fabricarse con madera aserrada con longitudes **mayores o iguales a 1.8 m.** (láminas de color , Figura 3-1)
- En elementos comprimidos o en la zona comprimida de elementos flexionados, se pueden usar piezas de madera aserrada con longitudes **menores de 1.8 m.** (láminas de color blanco, en Figura 3-1)




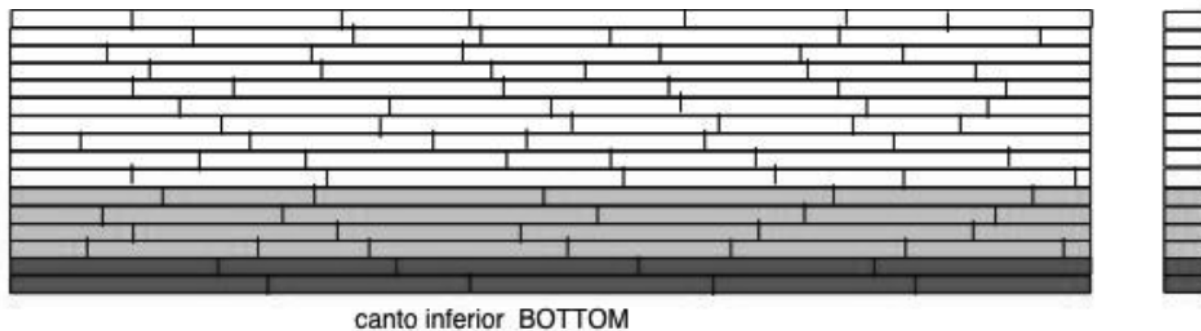


En elementos flexionados, para láminas ubicadas en zonas traccionadas (**el 75% de la mitad inferior de las vigas**), la distancia entre uniones endentadas en **láminas inferiores y superiores**, debe ser igual o **mayor que 15 cm.** (láminas de color  y , en Figura 3-2)

Figura 3-1: En la zona más oscura () las distancias entre uniones deben ser mayores o iguales a 1.8 m. En la zona de color blanco no hay restricciones de largo entre uniones.



Referencia: Arauco.

Figura 3-2: Extracto de la figura anterior. En las zonas de color  y  se debe respetar una distancia mínima entre uniones de 15 cm, distancia que está representada por las líneas de color blanco.



Referencia: Arauco.

3.2 Evolución de las propiedades mecánicas de la MLE en Chile

Transcurrido más de medio siglo desde la fabricación de las primeras estructuras de madera laminada encolada (MLE), en Valparaíso, es posible afirmar que esta tecnología ha evolucionado desde una condición experimental intuitiva a un grado de tecnificación que resulta suficiente para garantizar una producción confiable. Con intuitiva se refiere a condiciones sin mayores ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas del material y aplicando procesos productivos en condiciones que hoy día no se aceptarían.

Prescindiendo de algunas obras puntuales que durante la segunda mitad del siglo XIX recurrieron a la técnica de laminación por apernado, una de ellas aún en excelente estado de conservación (templo evangélico en el Cerro Concepción, Valparaíso). El primer antecedente de uso de MLE para aplicaciones estructurales en la construcción corresponde a una fábrica de puertas y ventanas (CIMSA) del año 1963, también en Valparaíso. Se constituye de un conjunto de 3 naves industriales, consistentes de arcos biarticulados de 20 m de luz, espaciados cada 4,85 m, con tensores que unen sus apoyos, cubriendo en total una superficie de 4.700 m². No se encontraron antecedentes detallados de cómo se calculó o construyó este proyecto, o si está demolido o destruido. En todo caso, en el Manual N°12 publicado por el departamento de construcciones en madera del INFOR el año 1979 se consignaba un buen estado de conservación hasta esa fecha.

Con el propósito de regular el potencial uso de la MLE en aplicaciones estructurales, el Instituto Forestal, INFOR, contrata el año 1964 a dos expertos finlandeses consultores de la FAO, Reino Mäkeläin y Erkki Niskanen, encargándoles estudiar la factibilidad del desarrollo de una industria nacional de MLE.

Mäkeläin, había sido gerente de producción del principal astillero finlandés de barcos de madera, donde se fabricaban además estructuras de MLE, a la vez que Niskanen, era profesor del Instituto Tecnológico de Helsinki.

Niskanen calculó algunas obras pioneras y redactó las especificaciones para su fabricación y construcción. Mientras que Mäkeläin supervisó la construcción de esos proyectos, aprovechando de capacitar al mismo tiempo profesionales y carpinteros.

Como culminación de sus actividades, los expertos concluyeron que el pino radiata se prestaba admirablemente para la construcción de elementos de MLE, tanto técnica como arquitectónicamente, y que el material podía competir favorablemente con el concreto y el acero. Alertan respecto a la necesidad imprescindible de implementar un sistema adecuado de Control de Calidad para asegurar la correcta fabricación, construcción y empleo del material.

Analizando la evolución posterior del material pareciera ser que esta última recomendación fue a la que menos atención se le prestó.

3.2.1 Consecuencias prácticas

Los expertos capacitaron profesionales tanto en el área del cálculo de estructuras de MLE como para la fabricación del material.

En Agosto de 1965 el INFOR publica el Informe Técnico 18, que constituye un manual de fabricación y cálculo de estructuras de MLE que incluye una proposición para la implementación de un Sistema de Control de Calidad para la fabricación de estructuras, instancia que transcurridos 52 años aún no se ha implementado.

En el Informe, se propone un primer conjunto de propiedades mecánicas admisibles para MLE de Pino radiata, aplicables a láminas fabricadas con madera aserrada de calidad III, a la que se asocia una razón de Resistencia 55%. La cuál queda caracterizada por las siguientes resistencias:

Flexión: 9,1 MPa; compresión paralela: 6,2 MPa; Cizalle: 0,96 MPa; compresión normal: 1,3 MPa; Módulo de Elasticidad: 12.000 MPa (9.360 MPa).

Con excepción del módulo de elasticidad en el que el valor derivado se indica entre paréntesis, estos valores se pueden derivar de la primera redacción de la norma NCh 1198. Of77, donde se establece que las propiedades mecánicas de la MLE se pueden derivar incrementando las propiedades mecánicas admisibles de la madera aserrada en 10% o en un 20%. Lo que depende de si la razón de resistencia, del grado estructural de madera utilizado para la fabricación de láminas, respetaba o superaba el límite 50%. Para la tensión admisible de cizalle y el módulo de elasticidad se especificaba para todos los casos el incremento del 20%.

En la Tabla 4 de la norma NCh 1190 Of77 se especifica para el Pino radiata en condición verde una tensión básica de flexión de 11,3 MPa. Para madera con un contenido de humedad no superior al 15% se permitía un incremento de 35% para esta propiedad.

Bajo la tutela del INFOR durante las siguientes dos décadas se construye una serie de proyectos, tanto en Santiago como en provincias, materializados en forma casi artesanal, sin que el sector privado mostrara mayor interés por incursionar en este campo y sin cooperación de la industria maderera. Para romper este "statu quo" el INFOR construye e implementa en Santiago una planta piloto de producción, abierta a todo público, desarrollando a la par, una serie de seminarios gratuitos de divulgación técnica.

Complementariamente elabora un paquete normativo orientado a regular la calidad de la materia prima, la calidad de la producción, la caracterización mecánica y los principios de diseño de los elementos estructurales de MLE de pino radiata.

Los aspectos relacionados con la derivación de propiedades mecánicas de MLE se plasman en la norma NCh 2165.-1989 Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de Pino radiata. La metodología operativa en este documento corresponde fielmente a la de la norma estadounidense ASTM 3737 Standard Method for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber.

El enfoque en ASTM-D3737 para derivar tensiones de diseño involucra un concepto de multiplicar el valor de una resistencia de madera libre de defectos, $RMLD$, por una razón de resistencia, RR :

$$MR_f = RMLD \cdot RR \quad (3-1)$$

Donde MR_f corresponde al Módulo de Rotura en flexión, $RMLD$ a la resistencia de madera libre de defectos y RR a la razón de resistencia.

Incorporando el concepto de tensión admisible de madera libre de defectos, definida como tensión básica de flexión $F_{b,f}$, esta expresión puede reescribirse en el nivel de tensión admisible, como:

$$F_f = F_{b,f} \cdot RR \quad (3-2)$$

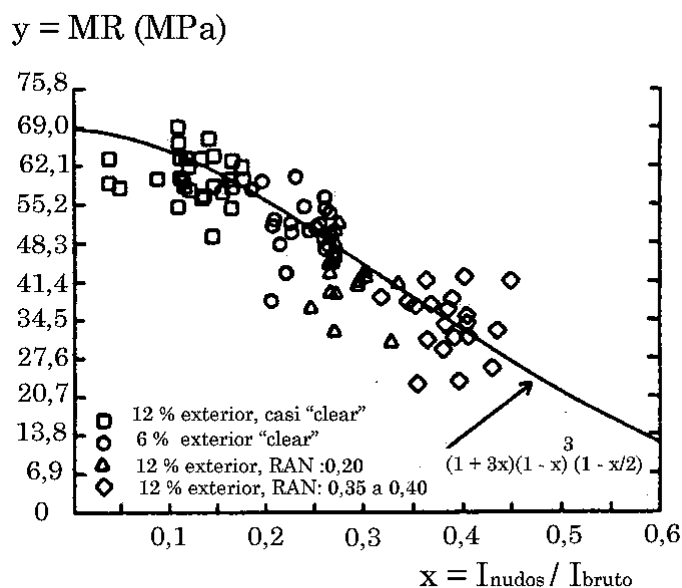
Donde F_f es la tensión admisible de flexión.

Los valores de RR dependen del menor de dos valores calculados sobre la base del efecto debilitante inducido por la inclinación de la fibra o del correspondiente a las nudosidades.

El método para incorporar el efecto de los nudos, se basa en una combinación de técnicas estadísticas y experimentales desarrollada por Freas y Salbo (1954). Para vigas que funcionan en laminación horizontal estas técnicas recurren a parámetros estadísticas de las nudosidades determinadas para cada uno de los grados estructurales de la madera utilizada para la fabricación de láminas. Información que permite calcular un cociente designado como I_n/I_g para una combinación específica de grados estructurales de láminas. Este valor corresponde al cociente entre los momentos de inercia de los nudos en una sección transversal en cualquier tramo de 30 cm de largo de viga, I_n , y el momento de inercia total de la sección, I_g . Este cociente I_n/I_g se relaciona empíricamente con la razón de resistencia en flexión.

La figura muestra la relación empírica determinada por Freas y Selbo entre la razón I_n/I_g y la Razón de Resistencia en flexión.

Gráfico 3-1: relación empírica entre la razón I_n/I_g y la Razón de Resistencia en flexión.



Referencia: Mario Wagner

Existen dos opciones para determinar la tensión básica de flexión, $F_{b,f}$. Una es seguir el mismo procedimiento general usado para madera aserrada establecido en ASTM-D 245. Y la otra opción, a la que se recurre para la mayoría de las vigas producidas en los EEUU, se basa en una interpretación de resultados de ensayos de laboratorio, utilizando una reformulación de la Ecuación (3-3).

$$RMLD = \frac{MR_f}{RR} \quad (3-3)$$

Y determinando:

$$F_{b,f} = \frac{RMLD_{p5\%}}{2.1} \quad (3-4)$$

Con $(RMLD)_{p,5\%}$: percentil del 5% de la distribución de RMLD para una especie, calculado mediante la ecuación (3-3).

El factor 2,1 es el factor de ajuste en flexión, que incorpora los factores de duración de carga y de uso final, con el que se relaciona la carga resistida en un ensayo que dura de 5 minutos a un período de 10 años. Los valores de $F_{b,f}$, basados en un análisis de información experimental de las décadas de los 60 y 70, se entregan en ASTM-3737 para grados visuales de Pino Oregón, Pino del Sur y Abeto Hem.

3.2.2 Derivación tensiones básicas

Para asegurar que los valores de diseño para vigas de MLE reflejan con exactitud las propiedades de la base de recursos (especies de madera), de la que se construyen, las propiedades materiales y la información experimental considerada deben ser revisadas periódicamente.

Las tensiones básicas indicadas en la redacción del año 1988 de la norma ASTM-D3737 se basan, como se mencionara anteriormente, en el análisis de vigas ensayadas.

La tensión básica se estima considerando para cada viga el módulo de rotura experimental y una estimación de la razón de Resistencia en flexión, usando la Ecuación (3-3). Las vigas diseñadas considerando esta tensión básica y ensayadas de acuerdo con la norma ASTM D-198, documento que describe el procedimiento para el ensayo de vigas de madera, debieran conducir a valores de resistencia de flexión tales como el percentil del 5% de estas exceda la tensión de diseño en flexión en un factor 2,1 con un 75% de confiabilidad estadística.

El método I_n/I_g se usa para calcular la razón de Resistencia en flexión. Esta razón toma en cuenta los efectos de la presencia de nudos en vigas de MLE sobre la base de su tamaño y ubicación. Se calculan el momento de inercia de los nudos, I_n , y de la sección transversal bruta de la viga, I_g , incorporándose de esta forma la mayor influencia debilitante que tiene los nudos que se encuentran en las láminas más desplazadas del eje neutro.

Este análisis requiere de información relativa a la organización de las distintas calidades de láminas durante el armado de las vigas, las propiedades de la madera, tanto el módulo de elasticidad como las frecuencias de ubicación y el tamaño de los nudos para los grados de madera utilizados en la fabricación de láminas.

La norma NCh 2165 usa la metodología descrita aplicándola sobre la información recogida para el Pino radiata por el INFOR en proyectos desarrollados con este fin en la década de los 80.

Propiedades mecánicas admisibles de madera laminada encolada de Pino radiata (laminación horizontal) derivadas conforme a NCh 2165-1989:

Tabla 3-1: Propiedades mecánicas admisibles MLE PR, NCh 2165-1989

Propiedades Mecánicas Admisibles [Mpa]		Altura de la Sección	Combinación de Armado		
			MLE A	MLE B	MLE A-B-A
Flexión	Ff	≤ 375 mm	9,3	7,2	8,9
		> 375 mm	8,2	6,4	7,8
Tracción Paralela	Ftp	-	5,6	3,1	4,0
Compresión Paralela	Fcp	-	9,5	5,4	8,0
Compresión Normal	Fcn	-	2,5	2,5	2,5
Cizalle	Fcz	-	1,1	1,1	1,1
Módulo de Elasticidad	Eprom	-	10700	8000	10300
	Ek	-	6000	4200	6100

Referencia: Mario Wagner

Capítulo 4 Antecedentes ensayos uniones endentadas

En este cuarto capítulo se presentan los resultados de ensayos en uniones endentadas que se realizaron para definir la calidad de las uniones, fijando la geometría, criterios de producción y el adhesivo a usar, se presenta así una introducción y finalmente los resultados obtenidos.

4.1 Introducción

En el marco de las actividades previas a la fabricación de las vigas de este trabajo de título, se procede a identificar la resistencia a tracción y flexión de tres diferentes conjuntos de uniones endentadas con el fin de determinar su resistencia a flexión y tracción, y así definir el adhesivo y criterios de producción más indicados para la fabricación de las uniones.

Todas las probetas tiene el mismo largo de diente de 16mm, diferenciándose entre sí por el adhesivo utilizado, un método de fabricación más riguroso y por los ensayos a realizar en cada grupo, teniéndose en total 255 probetas de dimensiones 30mm*130mm*3,2m. Los datos de las probetas se encuentran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Detalle probetas ensayos uniones endentadas.

Elemento	Tipo Madera	Composición	Adhesivos	Sección [mm ²]	Largo [m]	N° Ensayos		Mes
						Flexión	Tracción	
Finger	MPG 12	100%	MUF	30 x 130	3,2	55	80	Agosto
Finger	MPG 12	100%	RES	30 x 130	3,2	40	40	Septiembre
Finger	MPG 12	100%	MUF	30 x 130	3,2	0	40	Septiembre
Subtotal:						95	160	
Total:						255		

Referencia: Elaboración propia.

Las abreviaciones de los adhesivos de la tabla 4-1 corresponden a:

- RES = Fenol Resorcinol Formaldehído o PRF por sus siglas en inglés.
- MUF = Melamina Urea Formaldehído.

4.1.1 Metodología

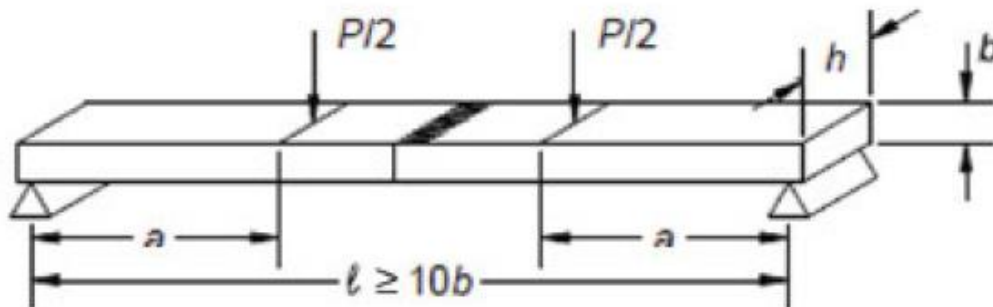
Previo a los ensayos se registraron las dimensiones de ancho, espesor y contenido de humedad en 3 zonas de cada probeta.

Los ensayos de las uniones dentadas se realizaron de acuerdo a las indicaciones de la norma chilena NCh2148-2013 y norma ISO10983. Esta última define la metodología a utilizar.

Flexión

El montaje consiste en una pieza dispuesta de cara y cargada en los puntos cuartos, tal como se ilustra en la Figura 4-1.

Figura 4-1: Esquema referencial ensayo a flexión



Referencia: INFOR

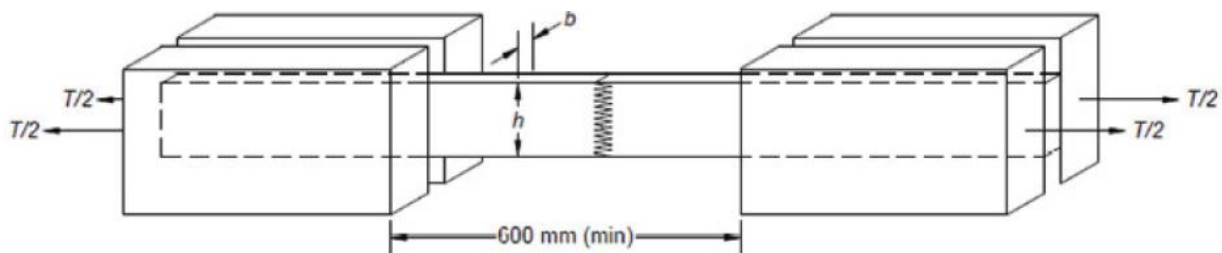
La unión de extremo debe estar centrada entre las dos cargas aplicadas. La duración del ensayo debe ser mayor o igual a 30s y la tensión de rotura se determina con la ecuación siguiente, con: $l = 900$ [mm] y $a = 300$ [mm].

$$f_m = \frac{3 \cdot P \cdot a}{h \cdot b^2} \quad (4-1)$$

Tracción

El montaje consiste en una pieza ubicada entre mordazas, con una separación mínima de 600mm (en este caso se eligió $L=610$ mm), y la unión de extremo centrada, tal como lo ilustra la Figura 4-2.

Figura 4-2: Esquema de ensayo de tracción con pieza centrada.



Referencia: INFOR

La duración de la carga debe estar comprendida entre 30s y 300s. La ecuación que determina la tensión máxima de rotura es la siguiente:

$$f_t = \frac{T}{b \cdot h} \quad (4-2)$$

4.2 Resultados ensayos uniones endentadas

En la Tabla 4-2, se presentan los resultados representativos para las uniones endentadas. Cabe destacar que no se muestran todos los resultados, importando más el promedio (prom), desviación estándar (stv), coeficiente de variación (cv) y resistencia característica (Rk) de las series de ensayos, ubicadas al final de la tabla.

Los meses Agosto y Septiembre corresponden a las fechas de realización de los ensayos. Se diferencian en la incorporación de mejoras en la producción, tales como una inspección más rigurosa, cambios en la maquina fresadora o cambios en la presión para unir las uniones endentadas. Mejoras que no se detallan en este documento.

Tabla 4-2: Resultados abreviados ensayos uniones endentadas.

Tipo de ensayo	Flexión		Tracción		
Adhesivo	MUF	RES	MUF	MUF	RES
Fecha Mes	Agosto	Septiembre	Agosto	Septiembre	Septiembre
	R [Mpa]	R [Mpa]	R [Mpa]	R [Mpa]	R [Mpa]
10 primeros	32,1	27,5	11,3	23,7	20,5
	32,2	32,6	12,4	24,3	20,8
	35,5	36,6	15,8	25,6	21,6
	37,5	37,1	15,8	26,5	21,8
	39,8	37,5	15,9	27,5	21,8
	42,2	37,7	17,6	28,3	21,8
	42,3	38,2	17,9	29,0	23,7
	43,0	38,5	17,9	31,4	25,8
	43,9	38,7	18,4	33,0	26,4
	44,0	39,3	18,5	34,0	27,0
10 últimos	58,7	59,9	37,7	48,1	45,4
	59,4	60,5	38,2	49,0	47,0
	59,5	61,8	40,1	49,3	47,2
	60,5	62,1	42,4	51,1	47,8
	60,7	63,5	42,4	53,9	48,2
	61,3	63,7	44,7	54,0	49,4
	62,4	64,5	45,6	54,6	49,5
	64,0	64,6	46,0	55,5	50,8
	64,2	65,2	51,8	57,2	51,8
	70,0	65,3	52,0	58,1	56,1
prom [Mpa]	51,15	50,8	28,3	40,8	36,9
stv [Mpa]	7,65	10,6	8,42	9,54	10,24
cv	15%	21%	30%	23%	28%
Rk [Mpa]	37,2	31,4	13,4	23,3	18,1

Referencia: INFOR

Tabla 4-3: Resistencias características ensayos uniones endentadas, flexión y tracción.

			Rk [Mpa]	Normalizado
Flexión	MUF	Agosto	37,2	100%
	RES	Septiembre	31,4	84%
			Rk [Mpa]	
Tracción	MUF	Agosto	13,4	58%
	MUF	Septiembre	23,3	100%
	RES	Septiembre	18,1	78%

Referencia: INFOR

Dentro de los ensayos a flexión, Tabla 4-3, se observa que las probetas con adhesivo MUF-Agosto obtienen una resistencia a flexión característica de 37,2 MPa, valor superior que las probetas de RES-Septiembre de 31,4 MPa. Resistiendo RES-Septiembre un 84% de lo resistido en MUF-Agosto.

En tracción, los resultados de MUF-Agosto arrojan un coeficiente de variación elevado ($cv=30\%$, Tabla 4-2), por lo que se propone realizar nuevamente esta serie, con nuevas mejoras en la fabricación del material, obteniéndose los resultados MUF-Septiembre. Estos últimos datos arrojan una resistencia a tracción característica mayor, al aumentar la resistencia de 13,4 a 23,3 MPa, correspondientes al 58% y 100% respectivamente y un coeficiente de variación menor al moverse de 30% a 23%.

Nuevamente se observa que las uniones con MUF resisten más que las con RES, 23,3 y 18,1 MPa respectivamente. Siendo la resistencia con RES-Septiembre un 78% de la resistencia observada por MUF-Septiembre, que al igual que MUF-Agosto adquieren un coeficiente de variación elevado ($cv=28\%$). Ya con esto, se propone la utilización del par MUF-Agosto para flexión y MUF-Septiembre para tracción, con todas las mejoras de producción que subyacen a cada serie de probetas y que no se sustentan necesariamente en el adhesivo usado.

Capítulo 5 Programa experimental vigas

En este quinto capítulo se da a conocer los resultados obtenidos con los ensayos de vigas, se presentan las principales características que distinguen a las series de vigas y se describe el ensayo.

5.1 Vigas

Con el propósito de cuantificar el efecto sobre las propiedades mecánicas, MoE y MR, al incorporar láminas fabricadas con madera de los grados estructurales mecánicos MGP y de aplicar una disposición vertical de láminas en el borde flexotraccionado se ensayaron diversos criterios de armado de vigas combinando dos grados mecánicos y dos grados visuales. Como patrón referencial se ensayaron vigas fabricadas combinando láminas de madera clasificada visualmente en los Grados A y B de NCh 2150, práctica que refleja el estado del arte actual de producción de la planta.

Para cuantificar el efecto sobre el módulo de rotura y el módulo de elasticidad de las vigas se definen 17 series experimentales, que se describen en lo siguiente:

Serie 1: Sus resultados se usarán como referencia de comparación ya que considera vigas fabricadas de acuerdo con la práctica habitual de la industria nacional, que recurre al empleo de tablas clasificadas en los Grados Visuales A y B de la norma NCh 2150 para la fabricación de láminas, disponiéndose las láminas Grado A en los sextos exteriores de la sección transversal, que en este caso comprende las dos láminas de borde y completándose el núcleo central con 6 láminas del Grado B.

Serie 2: Refleja el producto estándar pensado para vigas de alta capacidad resistente, incorporando tablas clasificadas en el Grado MGP 12 para la fabricación de las dos láminas de ambos bordes y tablas del Grado MGP10 para las 6 láminas centrales.

Serie 2B: Se relaciona con la Serie 2, diferenciándose en el adhesivo utilizado.

Serie 3: Se relaciona con la Serie 2. Se tiene por objeto evaluar la incidencia del núcleo central sobre los módulos investigados, reemplazando en la fabricación de estas láminas las tablas del Grado Mecánico MGP 10 por tablas clasificadas por el menor grado visual, esto es, correspondientes al Grado B.

Serie 4: Se relaciona con la Serie 2. Tiene por objeto comparar la incidencia de las láminas de borde del sector flexocomprimido sobre los módulos investigados, reemplazando en la fabricación de las láminas del borde superior las tablas del Grado Mecánico MGP 12 por tablas del MGP 10.

Serie 5: Se relaciona con la Serie 2. Tiene por objeto comparar la incidencia de las láminas de borde del sector flexocomprimido y del núcleo central sobre los módulos investigados, reemplazando las láminas de estos sectores por láminas fabricadas con tablas correspondientes al grado visual más débil, esto es, correspondientes al Grado B.

Serie 6: Se relaciona con la Serie 2. Tiene por objeto analizar el efecto de la incorporación de un paquete de laminación vertical de láminas del grado mecánico MGP12 en el borde flexotraccionado sobre los módulos estudiados.

Serie 7: Se relaciona con la Serie 2. Tiene por objeto analizar el efecto de la incorporación de un paquete de laminación vertical de láminas MGP12 en el borde flexotraccionado y de láminas horizontales del Grado MGP10 en el borde flexocomprimido sobre los módulos investigados.

Serie 8: Se relaciona con las Series 1 y 2. Tiene por objeto comparar la incidencia de utilizar exclusivamente láminas fabricadas con tablas clasificadas en el menor Grado Mecánico, el MGP10, en la fabricación de las vigas.

Serie 9: Se relaciona con la Serie 8. Tiene por objeto comparar la incidencia de incorporar láminas fabricadas con el Grado Visual más débil en el núcleo de las 6 láminas centrales sobre los módulos investigados.

Serie 10: Se relaciona con la Serie 8 y 9. Tiene por objeto comparar la incidencia de las láminas de borde del sector flexocomprimido y del núcleo central sobre los módulos investigados, reemplazando las láminas de estos sectores por láminas fabricadas con tablas correspondientes al grado visual más débil, esto es, correspondientes al Grado B.

Serie 11: Se relaciona con la Serie 10. Tiene por objeto analizar la incorporación de un paquete de laminación vertical de láminas del mismo grado MGP10 en el borde flexotraccionado sobre los módulos investigados.

Serie 12: Se relaciona con la Serie 1. Tiene por objeto analizar el efecto de la incorporación de un paquete de laminación vertical de láminas Grado A en el borde flexotraccionado sobre los módulos investigados.

Serie 13: Se relaciona con la Serie 1. Tiene por objeto analizar el efecto de la incorporación de un paquete de laminación vertical de láminas de Grado A en el borde flexotraccionado y de láminas horizontales del menor grado visual en el borde flexocomprimido sobre los módulos investigados.

Serie 14: Se relaciona con la Serie 1. Tiene por objeto comparar la incidencia de utilizar exclusivamente láminas fabricadas con tablas clasificadas en el menor Grado Visual, el B, sobre los módulos investigados.

Serie 15: Se relaciona con la Serie 14. Tiene por objeto analizar el efecto de la incorporación de un paquete de laminación vertical de láminas del menor grado visual, el B, en el borde flexotraccionado sobre los módulos investigados.

Serie 16: Se relaciona con la Serie 2 y tiene por objeto analizar el efecto de la altura de la sección transversal de la viga sobre los módulos investigados dado que las probetas de esta serie mantienen el criterio de armado de la Serie 2 pero tienen una altura que la duplica.

Para complementar la información entregada de cada una de las series descritas anteriormente, en la Tabla 5-1 se presenta la cantidad de probetas a ensayar, las dimensiones de las probetas y los adhesivos. Así también se presentan los esquemas de armado de las vigas en la Figura 5-1 y la Figura 5-2.

En la Tabla 5-1, columna 5, adhesivos; se observan las abreviaciones MUF-PUR y RES-PUR. La primera sigla denota el nombre del adhesivo utilizado en el endentado y el segundo el adhesivo utilizado en la línea de cola. Por lo cual, MUF-PUR significa Melamina Urea Formaldehído en el endentado y Poliuretano en la línea de cola. Y RES-PUR significa Phenol Resorcinol Formaldehído en el endentado y Poliuretano en la línea de cola. Cabe destacar que sólo la serie 2B tiene adhesivos diferentes a las demás.

Tabla 5-1: Detalle series vigas.

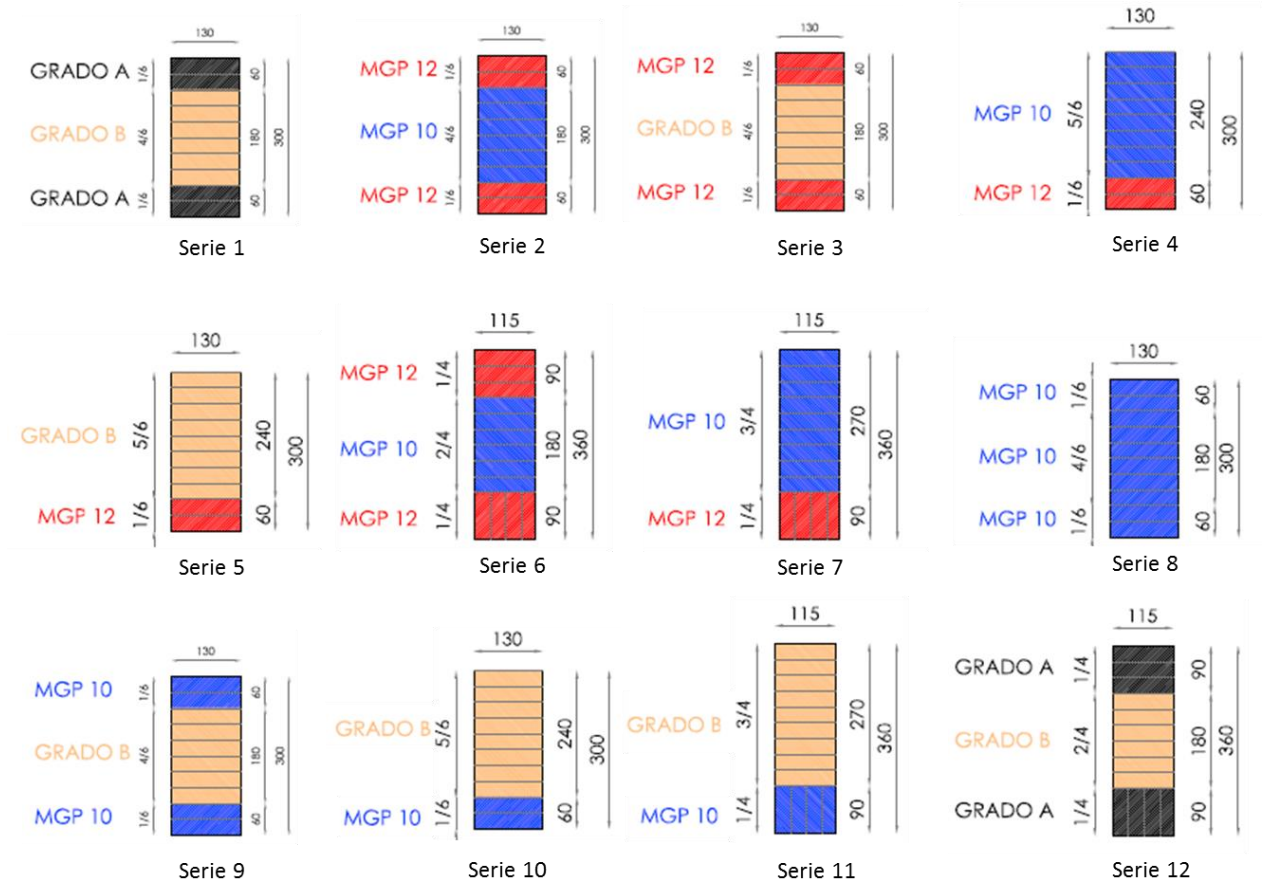
Serie	Tipo Madera	Composición	Adhesivos	Sección [mm ²]	Largo [m]	N° Ensayos	
						Tracción	Flexión
1	A / B / A	1/6 - 2/3 - 1/6	MUF-PUR	130 X 300	6,6	-	6
2	MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	1/6 - 2/3 - 1/6	MUF-PUR	130 X 300	6,6	-	6
3	MGP 12 / B / MGP 12	1/6 - 2/3 - 1/6	MUF-PUR	130 X 300	6,6	-	3
4	MGP 10 / MGP 12	5/6 - 1/6 (inferior)	MUF-PUR	130 X 300	6,6	-	3
5	B / MGP 12	5/6 - 1/6 (inferior)	MUF-PUR	130 X 300	6,6	-	3
6	MGP 12 / MGP 10 / T MGP 12	1/4 - 2/4 - 1/4 (vertical)	MUF-PUR	115 X 360	6,6	-	3
7	MGP 12 / T MGP 10	3/4 - 1/4 (vertical)	MUF-PUR	115 X 360	6,6	-	3
8	MGP 10 / MGP 10 / MGP 10	1/6 - 2/3 - 1/6	MUF-PUR	130 X 300	6,6	-	3
9	MGP 10 / B / MGP 10	1/6 - 2/3 - 1/6	MUF-PUR	130 X 300	6,6	-	3
10	B / MGP 10	5/6 - 1/6 (inferior)	MUF-PUR	130 X 300	6,6	-	3
11	B / T MGP 10	3/4 - 1/4 (vertical)	MUF-PUR	115 X 360	6,6	-	3
12	A / B / T A	1/4 - 2/4 - 1/4 (vertical)	MUF-PUR	115 X 360	6,6	-	3
13	B / T A	3/4 - 1/4 (vertical)	MUF-PUR	115 X 360	6,6	-	3
14	B / B / B	1/6 - 2/3 - 1/6	MUF-PUR	130 X 300	6,6	-	3
15	B / T B	3/4 - 1/4 (vertical)	MUF-PUR	115 X 360	6,6	-	3
16	MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	1/6 - 2/3 - 1/6	MUF-PUR	130 X 600	6,6	-	3
2B	MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	1/6 - 2/3 - 1/6	RES-MUF	130 X 300	6,6	-	6
total:						-	60

Referencia: Carolina Urrutia, Arauco S.A.

Cabe destacar que hay 4 grandes grupos de series de vigas diferenciadas por la disposición de sus láminas, Figura 5-1 y Figura 5-2:

- Simétricas con laminación horizontal: S1, S2, S2B, S3, S8, S9, S14 y S16.
- Asimétricas con laminación horizontal: S4, S5 y S10.
- Simétricas con laminación vertical es zona flexotraccionada: S6, S12 y S15.
- Asimétricas con laminación vertical es zona flexotraccionada: S7, S11 y S13.

Figura 5-1: Cortes transversales de vigas a ensayar. Laminación horizontal.



Referencia: Carolina Urrutia, Arauco S.A.

Figura 5-2: Cortes transversales de vigas a ensayar. Laminación vertical en cuarto inferior.



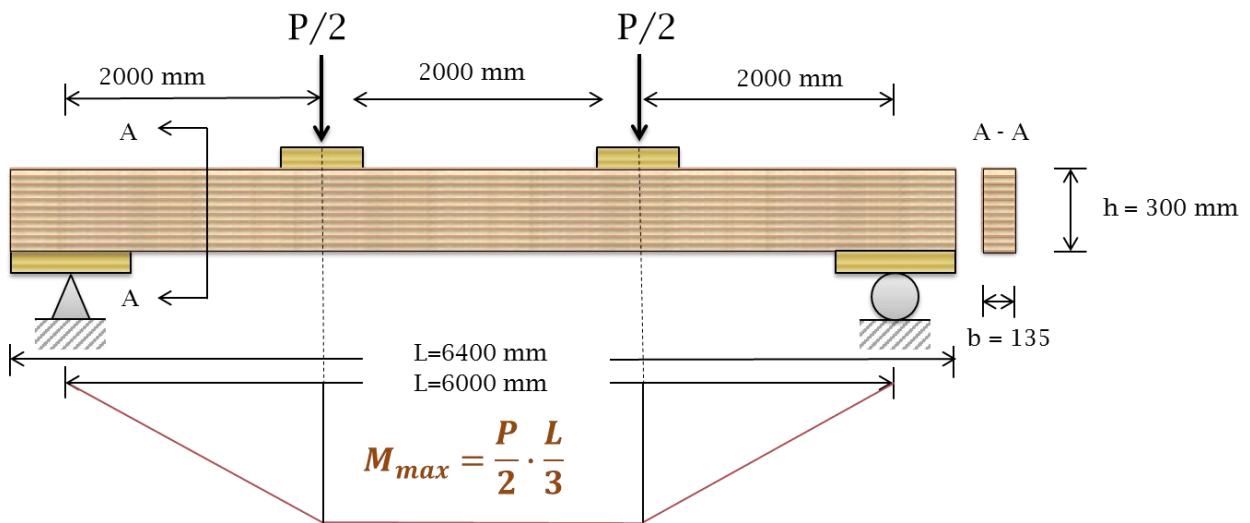
Referencia: Carolina Urrutia, Arauco S.A.

5.2 Descripción del ensayo de vigas

El procedimiento experimental se llevó a cabo respetando las especificaciones de la norma ISO 8375 Timber structures — Glued laminated timber — Test methods for determination of physical and mechanical properties, como se muestra en la Figura 5-3.

Con excepción de una única serie, las probetas consistieron de vigas de MLE de sección 130mm*300 mm para una disposición horizontal de 10 láminas de espesor 30 mm, y 115*360 mm para vigas con el borde flexotraccionado armado con una disposición vertical de 4 láminas de ancho 90 mm ubicadas bajo una disposición horizontal de 9 láminas de espesor 30mm, cubriéndose en todos los casos una luz de 6,00 m. La carga se aplicó en forma concentrada en los puntos tercios de la luz, tal como se ilustra en la Figura 5-3. La serie faltante consistió de vigas de sección 130*600 mm con una disposición horizontal de 20 láminas de espesor 30 mm. La duración de la carga típica es de 180s.

Figura 5-3: Detalle ensayo y probeta típica del ensayo a flexión.



Referencia: Elaboración propia.

De acuerdo con esta configuración el Módulo de Rotura en flexión, MR_f , se calcula como:

$$MR_f = \frac{a \cdot P_u}{2 \cdot W} \text{ [MPa]} \quad (5-1)$$

- Donde P_u : Carga máxima resistida por la viga, en Newton.
- a : Distancia entre un punto de aplicación de carga y el apoyo más cercano, en mm.
- W : Módulo resistente de la sección transversal, en mm³.

Para la implementación experimental esquematizada en la Figura 5-3, la expresión anterior se reduce a:

$$MR_f = \frac{P_u \cdot l}{b \cdot h^2} \text{ [MPa]} \quad (5-2)$$

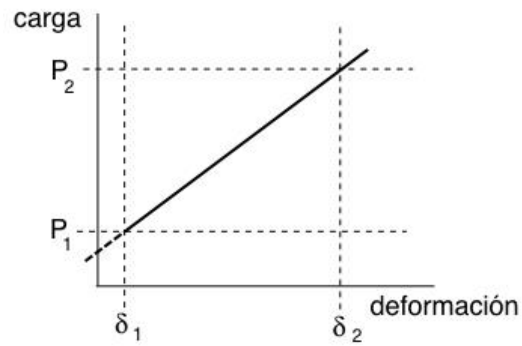
- Donde l : Distancia entre apoyos, en mm.
- b : Espesor de la sección transversal, en mm.
- h : Altura de la sección transversal, en mm.

Y el Módulo de Elasticidad, MoE , en el rango elástico se estima como:

$$MoE = \frac{l^2 \cdot (P_2 - P_1)}{b \cdot h^2 \cdot (\delta_2 - \delta_1)} \cdot \left[\left(\frac{3 \cdot a}{4 \cdot l} \right) - \left(\frac{1}{l} \right)^3 \right] \text{ [MPa]} \quad (5-3)$$

- Donde $(P_2 - P_1)$: Incremento de carga en la zona lineal de la curva carga deformación, en Newton.
- $(\delta_1 - \delta_2)$: Incremento de deformación correspondiente a $(P_2 - P_1)$, en mm.

Figura 5-4: Diagrama carga-deformación en el rango elástico.



De acuerdo a lo descrito, el ensayo a rotura de una viga se materializa en la figura siguiente:

Figura 5-5: Viga de MLE (Pino radiata) durante ensayo a flexión.



En la figura anterior, se aprecian además, dos triángulos que representan los puntos de apoyo de la viga, y dos flechas simbolizando los puntos de aplicación de la carga (ampliación en Figura 5-6).

Figura 5-6: Ampliación vista ensayo, puntos de carga.



Capítulo 6 Resultados

En este sexto capítulo, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos a flexión de las vigas, por medio del Módulo de Rotura de cada probeta y el Módulo de Rotura característico de cada serie.

6.1 Resistencia - Módulo de rotura

6.1.1 Resultados programa experimental

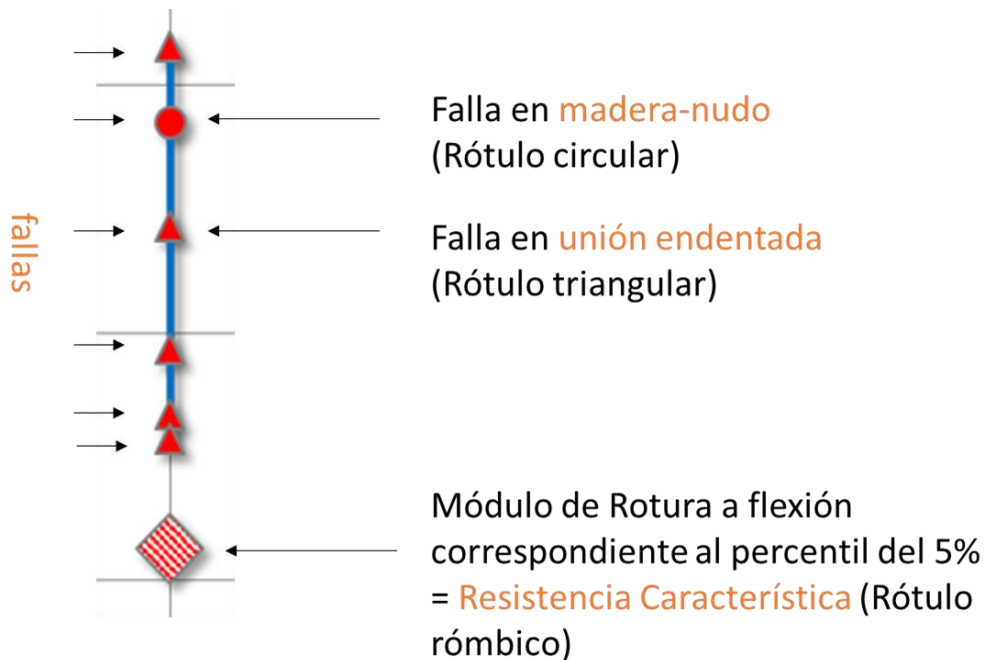
El Gráfico 6-1 ilustra los resultados experimentales a flexión de las 17 series estudiadas. Los colores del gráfico, corresponden a las calidades de láminas de las vigas, colores que ya se utilizaron en el capítulo anterior y corresponden a: Grado MGP12= rojo, Grado MGP10 = azul, Grado A = negro y Grado B = rosado.

Hay tres tipos de rótulos: triangular, circular y rómbico. Tanto el triangular como el circular corresponden al MR de una probeta ensayada diferenciándose en el modo de falla: rótulo triangular si la falla fue en la unión endentada y circular si la falla fue en la madera o nudosidades. El rótulo rómbico corresponde al valor del MR asociado al percentil del 5% calculado mediante lo descrito en el Apéndice A: Cálculo del valor estadístico asociado al percentil 5%.

El detalle de los resultados obtenidos se presenta en el Apéndice B: Tablas de resultados.

Ya descrito cada uno de los rótulos, la Serie 2 se ve de la siguiente manera:

Figura 6-1: Leyenda ejemplo serie 2.

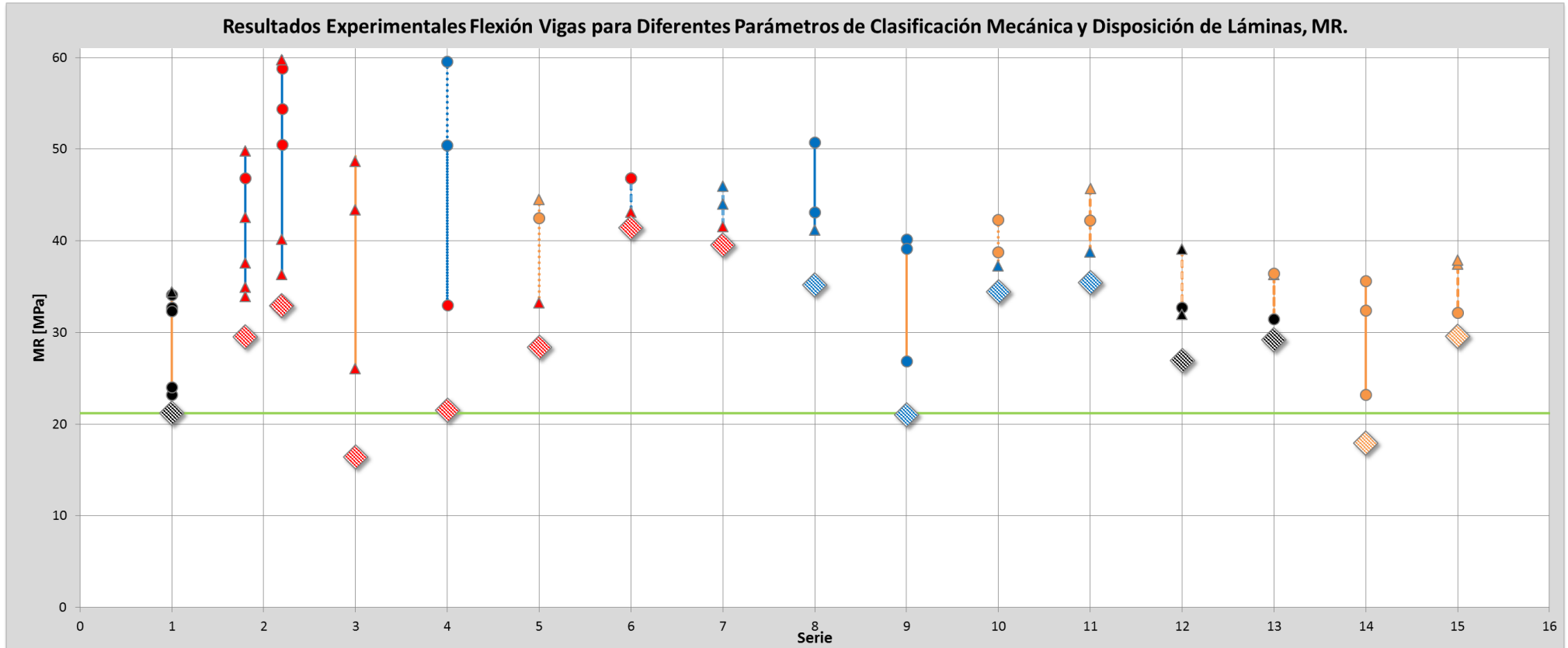


El esquema de la figura 6-1 contiene colores rojos y azules, lo que significa que la viga está formada a partir de láminas MGP12 y MGP10. Y debido a que los rótulos de ambos extremos son rojos y la línea que los une son azules, los sextos superior e inferior se componen de MGP12 y los 4/6 del medio son MGP10.

Ya comprendido lo anterior, el siguiente paso es visualizar todas las series y sobretodo, los MR asociados al percentil del 5%, que corresponden a la herramienta principal utilizada para comparar los distintos tipos de vigas (Gráfico 6-1).

Por motivos que escapan a las responsabilidades de este trabajo de título, no se realizaron los ensayos de la tipología de serie 16. Cabe destacar que las series 2 y 2B se encuentran en el gráfico cerca al valor 2 del eje de las abscisas lo que se explicará en las páginas siguientes. Además se encuentra una línea de color verde que representa el eje de referencia establecido por la resistencia característica de la serie 1, la serie patrón.

Gráfico 6-1: Resultados experimentales flexión vigas para diferentes parámetros de clasificación mecánica y disposición de láminas.



Fuente: Elaboración Propia.

6.2 Rigidez - Módulo de elasticidad

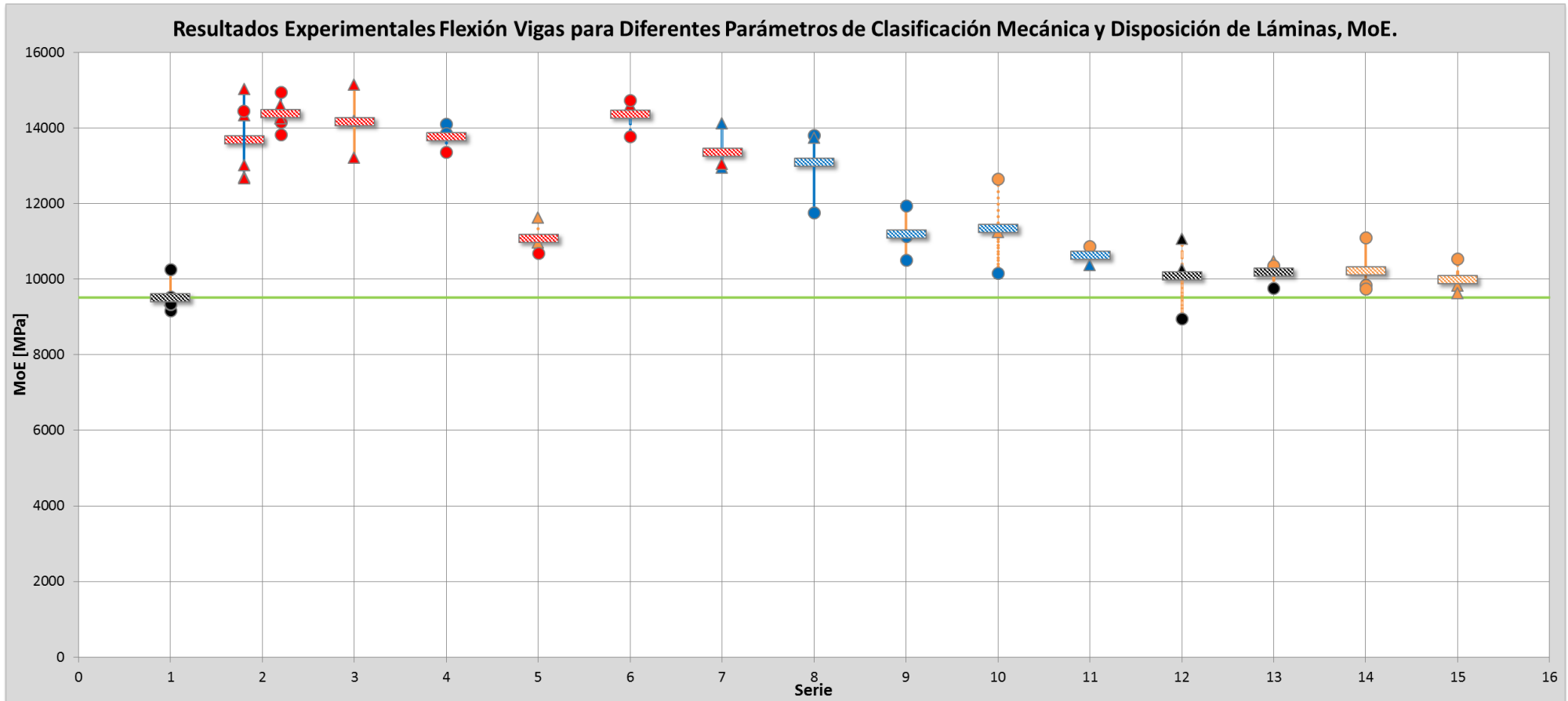
6.2.1 Resultados programa experimental

El Gráfico 6-2, presente en la página siguiente, muestra el Módulo de Elasticidad, MoE, para cada una de las series, además del Módulo de Elasticidad característico asociado al promedio de los datos.

Se mantiene la misma la leyenda del capítulo anterior con la excepción de que el rótulo del valor característico es un rectángulo en vez de un rombo y que este valor característico corresponde al valor medio y no al valor del percentil asociado al 5%.

Las tablas de resultados asociados a los gráficos de este capítulo se encuentran en el Apéndice B.

Gráfico 6-2: Módulo de elasticidad para cada una de las tipologías.



Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo 7 Discusión de resultados

En este séptimo capítulo se presenta inicialmente la justificación estadística de que la serie 2 y 2B corresponden a una única muestra, en segundo lugar se procede a analizar los resultados de resistencia tanto por modo de falla como por valores característicos. Luego se analizan los modos de fallas y valores característicos para los resultados de rigidez y finalmente se comparan los resultados experimentales con las determinaciones analíticas obtenidas de dos normas europeas.

7.1 Series 2 y 2B

Tanto la serie 2 como la 2B están compuestas en la misma proporción de láminas de calidad MGP12, MGP10 y MGP12. Se diferencian únicamente en el adhesivo utilizado. Por lo que resulta conveniente estudiar si ambas series son estadísticamente iguales, para esto, se procede a realizar una prueba T de Student. La prueba se realiza tanto para los valores del Módulo de Rotura como para el Módulo de Elasticidad.

Los resultados están presentan en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1: Test T-Student para Serie 2 y 2B.

	Nombre	MR [Mpa]	PruebaTStudent, MR	MoE [Mpa]	PruebaTStudent, MoE
Serie 2 MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	S2-01	42,5	✓ 9%	12710	✓ 18%
	S2-02	34,9		12666	
	S2-03	49,8		14342	
	S2-04	33,9		13023	
	S2-05	46,8		14456	
	S2-06	37,6		15043	
Serie 2B MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	S2B-01	58,84		14955	
	S2B-02	54,42		14156	
	S2B-03	59,71		14554	
	S2B-04	40,15		14255	
	S2B-05	36,29		14594	
	S2B-06	50,50		13831	

Para que ambas series se definan de la misma familia, la prueba T-Student debe dar mayor al 5%.

Debido a que en los dos casos se superó el criterio, ambas series son estadísticamente iguales, corresponden a la misma serie 2 y se ilustran en la misma columna en el gráfico siguiente, Gráfico 7-1.

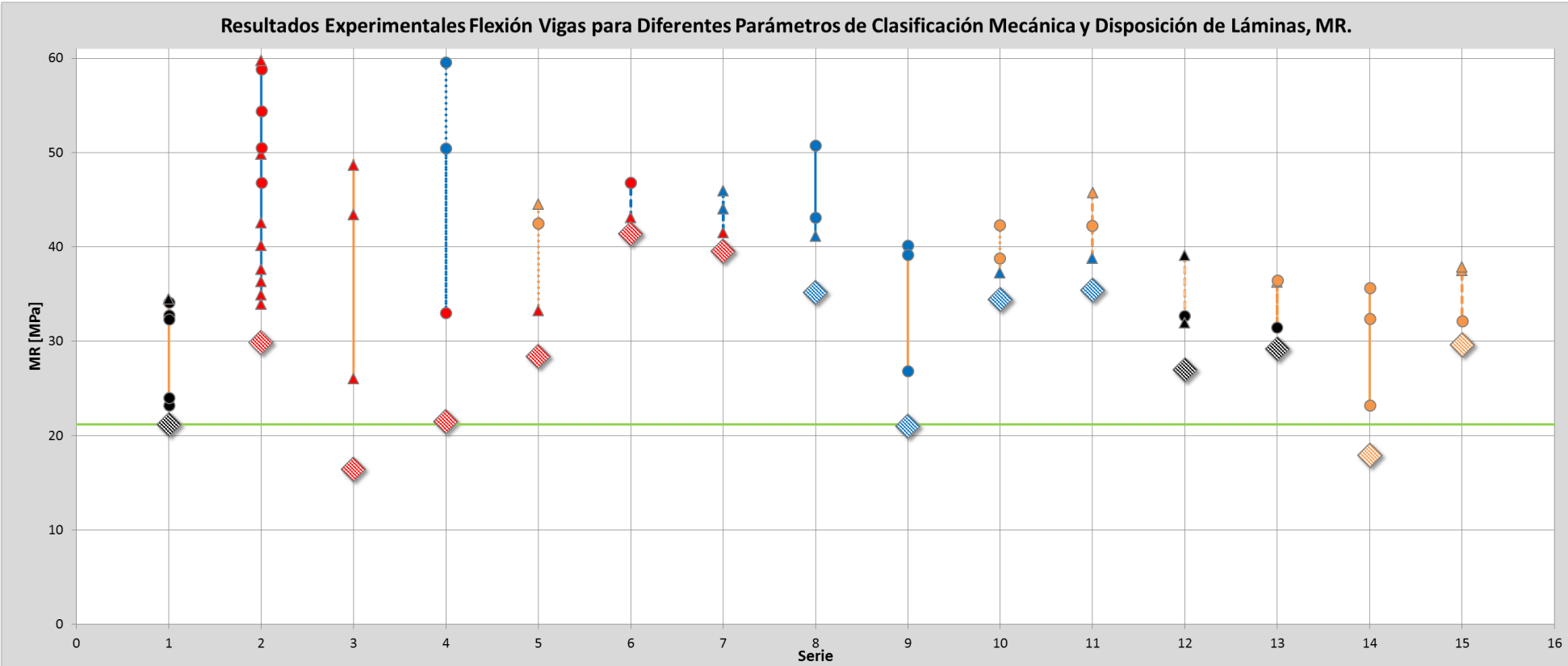
7.2 Resistencia - Módulo de rotura

7.2.1 Análisis del modo de rotura en las vigas ensayadas

Los modos de falla en vigas de MLE se separan en dos grupos: fallas en madera y fallas en unión endentada. Las fallas en madera pueden ser causadas tanto por nudosidades como por inclinaciones de fibra. Las fallas en unión endentada corresponden al registro de si existe algún indicio por pequeño que sea del comienzo de la falla en alguna unión endentada de la última lámina.

El gráfico siguiente se complementa con las tablas presentes en el Apéndice B: Tablas de resultados.

Gráfico 7-1: Resultados experimentales flexión vigas. Serie 2 y 2B están combinadas.



Referencia: Elaboración propia.

Serie 1 y Serie 2

Analizando los modos de rotura en el Gráfico 7-1, se aprecia que hay diferencias importantes entre los modos de fallas de la serie 1 en comparación a la serie 2. Si en la serie 1 el inicio de la rotura en una unión endentada se produjo en 1 de 6 casos (17%), en la serie 2 se da en 8 de 12 casos (67%).

Este efecto se explica debido a que la resistencia a flexión de una viga de MLE está compuesta por la combinación de dos factores: madera y uniones endentadas. Por lo cual para mejorar la calidad de la viga en su totalidad se debe elevar la resistencia de ambos factores (Colling, 1995).

La calidad de las láminas inferiores de la serie 1 (Grado A) es menor que las de la serie 2 (Grado MGP12) pero el endentado utilizado es el mismo. Por lo que es natural que se aprecie una mayor cantidad de fallas por madera en la primera y una mayor cantidad fallas iniciadas en una unión endentada en la segunda. Y explica, por lo demás, que la resistencia a tracción alcanzada por las uniones endentadas es superior a las láminas de Grado A pero inferior a las láminas de Grado MGP12.

Este mismo efecto se evidencia en un estudio realizado en Argentina (Ramos, Sosa, Gómez, Torrán, & Piter, 2014), donde se aprecia que para vigas de mejor calidad de láminas se obtuvo una mayoría considerable de inicio de rotura en uniones endentadas, e indica que la continuidad lograda por la unión endentada es más débil que la resistencia de la madera para el grado correspondiente.

Comparación por tipo de laminación

Si se agrupan las series por disposición de sus láminas, se obtienen dos grupos que engloban a los cuatro ya mencionados, estos dos grupos son: series con laminación horizontal (S1, S2, S2B, S3, S8, S9, S14 y S16; S4, S5 y S10) y series con laminación vertical en zona flexotraccionada (S6, S12 y S15; S7, S11 y S13). Cuyos resultados se presentan en el Gráfico 7-2.

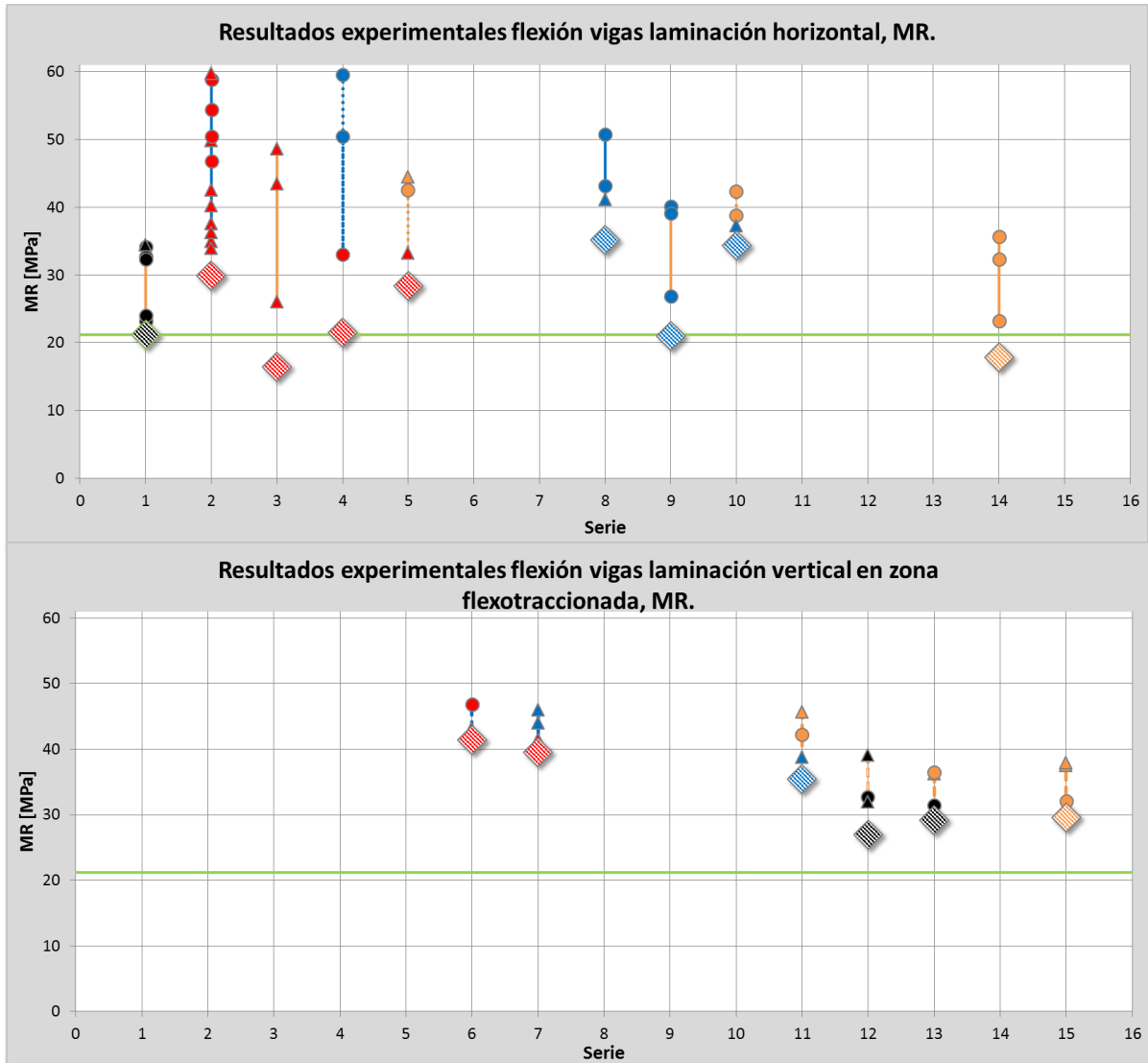
En este gráfico se aprecia una diferencia notable entre ambos grupos ya que en el segundo grupo, gráfico inferior, la desviación de los datos es marcadamente menor y con ello el valor de la resistencia a flexión característica (rótulo rómbico) de las series es mayor.

Lo observado se explica gracias a que al variar la disposición de las láminas, disminuye la influencia de las uniones endentadas debido a la colaboración de las láminas verticales adyacentes lo que cambia el modo de falla de las láminas inferiores y aumenta la resistencia total de la viga.

Cabe destacar que en el Gráfico 7-2 inferior se observa una mayoría de fallas iniciadas por uniones endentadas (67%), pero sorprendentemente no corresponden a los rótulos de menor resistencia en cada serie, lo que se encuentra en línea con lo anteriormente planteado y se contrapone con las fallas iniciadas por uniones endentadas del gráfico superior (41%).

Finalmente en las series con laminación horizontal, las fallas iniciadas en uniones endentadas disminuyen a medida que se utilizan láminas de menor resistencia, Gráfico 7-2 superior, por lo que se aprecia que el subgrupo conformado por láminas del Grado MGP12 (de color rojo) contiene una mayoría de fallas en uniones (62%), el grupo con láminas del grado MGP10 (azul) contiene menos fallas (22%) y el tercer subgrupo compuesto por las series 1 y 14, de grados visuales (negro y naranja), contiene un número aún más reducido (11%). Este comportamiento también se aprecia en los subgrupos de series del gráfico inferior (83%, 67% y 56%).

Gráfico 7-2: Resultados experimentales agrupados por tipo de laminación.



En definitiva la disposición de láminas de manera vertical en el borde flexotraccionado disminuye notablemente la influencia de los defectos en la madera o defectos en uniones endentadas al no traducirse en bajas resistencias a flexión de las vigas tal como Sandoz afirma en las conclusiones finales en la sección Revisión bibliográfica.

Finalmente se debe tener especial énfasis en la fabricación de uniones endentadas en vigas con laminación horizontal debido a que la presencia de defectos es mucho más vinculante con la resistencia final del elemento que en vigas con laminación vertical en la zona flexotraccionada.

Detalle probetas con baja resistencia y correlación con modo de falla

A continuación se presentan fotografías de las probetas que menos resistieron para cada serie (1/3 de las probetas por serie) además de observaciones para el tipo de falla.

Tabla 7-2: Detalle viga S1-01.


Viga S1-01	Tipo de Falla: Madera
MRk: 23.2 MPa	Observaciones: Nudosidades fuera de norma, acebolladura en la tercera lámina. Los nudos abarcan un 45% de la lámina.
 The image block contains three visual elements. At the top is a photograph of a long, light-colored wood beam with several knots and a visible longitudinal crack. Below this, on the left, is a schematic diagram of a beam cross-section with a vertical axis, a horizontal axis, and a red arrow pointing right, indicating the direction of force. To the right of the diagram is a close-up photograph of a wood cross-section showing a distinct longitudinal crack and a large knot.	

Tabla 7-3: Detalle viga S1-04.


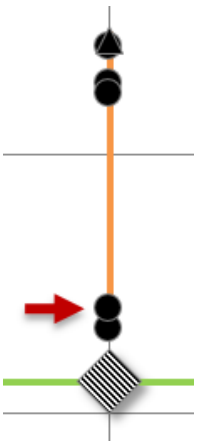

Viga S1-04	Tipo de Falla: Madera
MR: 24.0 MPa	Observaciones: Inclinationes de fibra marcadas por nudosidad inmediatas. Los nudos abarcan un 35% de la lámina.
Fotos	
	
	

Tabla 7-4: Detalle viga S2-02.

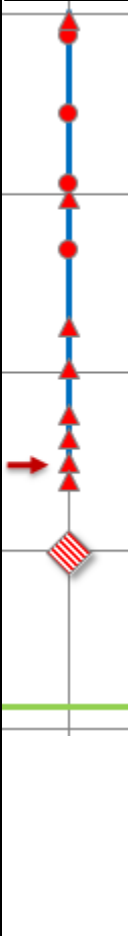

Viga S2-02	Tipo de Falla: Unión Endentada
MR: 34.9 MPa	Observaciones: 70% uniones endentadas, 30% madera. Dientes Limpios.
Fotos	
	

Tabla 7-5: Detalle viga S2-04



Viga S2-04	Tipo de Falla: Unión Endentada
MR: 33.9 MPa.	Observaciones: 20% uniones endentadas, 80% madera
Fotos	
 Diagrama de la viga S2-04 que muestra la posición de la cámara y la zona de falla. El diagrama consiste en una línea vertical azul con varios triángulos rojos que indican puntos de medición o inspección. Una flecha roja apunta hacia la izquierda desde un punto específico, indicando la ubicación de la cámara. En la parte inferior del diagrama, hay un símbolo de rombo con rayas diagonales que representa la zona de falla.	 Fotografía de la viga S2-04 que muestra la zona de falla de la unión endentada. La imagen principal muestra una sección de la viga de madera con una unión endentada que está suelta y se está desmenuzando. Una imagen de inserción en la parte inferior derecha proporciona un primer plano de la zona de falla, mostrando la separación de las fibras de la madera y la estructura de la unión.

Tabla 7-6: Detalle viga S3-01.




Viga S3-01	Tipo de Falla: Unión Endentada
MR: 26.0 MPa	Observaciones: 45% uniones endentadas 65% madera
Fotos	
	
	

Tabla 7-7: Detalle viga S4-02.

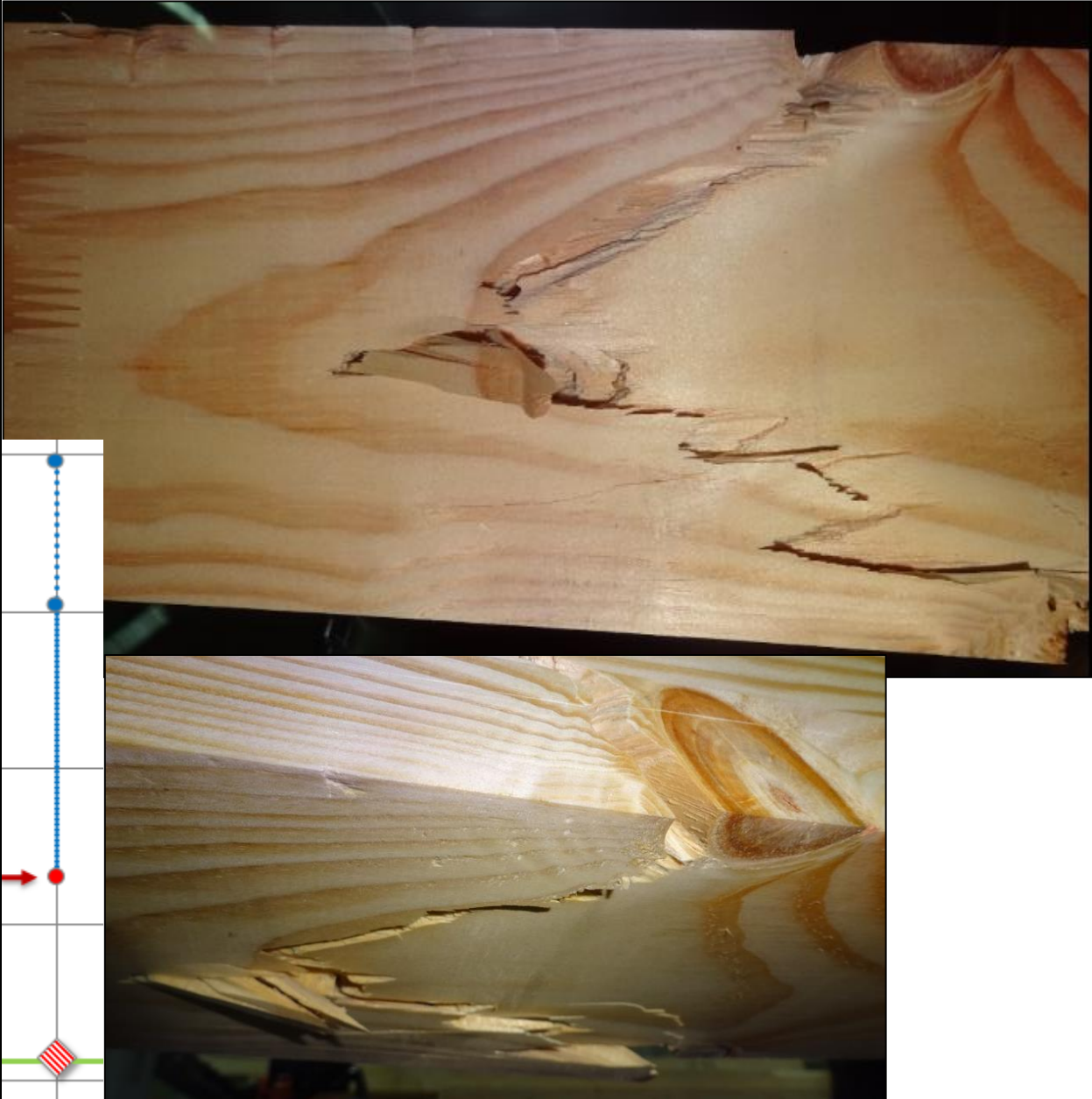
Viga S4-02	Tipo de Falla: Madera
MR: 33.0 MPa	Observaciones: Inclínación de fibra pronunciada.
Fotos	
 The image displays two photographs of a wooden beam, likely a structural member, showing significant fiber inclination. The top photograph shows a close-up of the wood grain, which is heavily distorted and curved, indicating a failure mode. The bottom photograph shows a similar view from a different angle, highlighting the extent of the fiber inclination. To the left of the photographs is a schematic diagram of the beam's cross-section. The diagram shows a vertical beam with a blue dashed line representing the fiber orientation. A red dot with a red arrow pointing to the right is located at the bottom of the beam, indicating the location of the failure. A red and white striped diamond symbol is located at the bottom left corner of the diagram.	

Tabla 7-8: Detalle viga S5-01.

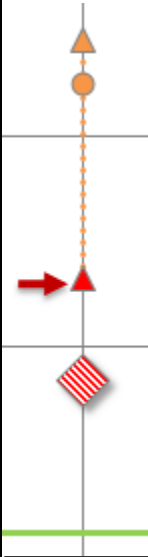


Viga S5-01	Tipo de Falla: Unión Endentada
MR: 33.2 MPa	Observaciones: Unión endentada limpia. Falla adhesivo.
	
	

Tabla 7-9: Detalle viga S6-01.




Viga S6-01	Tipo de Falla: Unión Endentada	
MR: 43.1 MPa	Observaciones: Dientes Limpios	
Fotos		
		
		

Tabla 7-10: Detalle viga S7-01.


Viga S7-01	Tipo de Falla: Unión Endentada
MR: 41.5 MPa	Observaciones: Dientes limpios.
	

Tabla 7-11: Detalle viga S8-02.

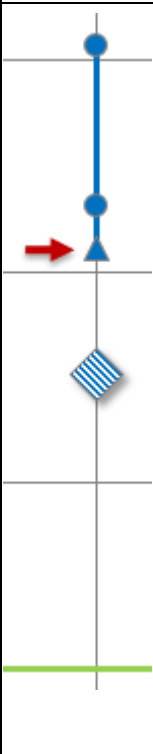


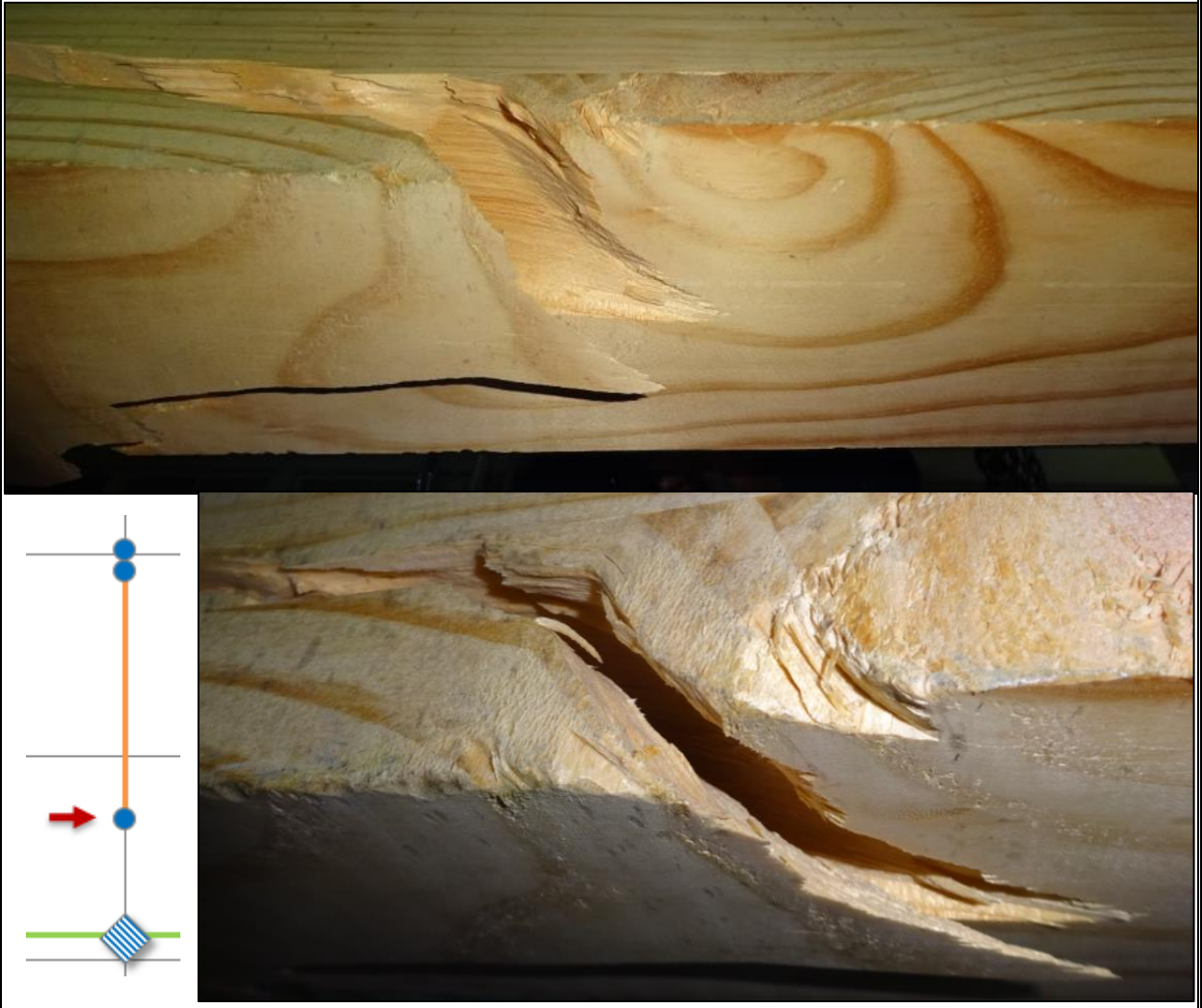
Viga S8-02	Tipo de Falla: Unión Endentada por Madera
MR: 41.1 MPa	Observaciones: Algunas uniones endentadas puras, 15% ue, 85% madera. Acebolladura en 2da lám.
	
	

Tabla 7-12: Detalle viga S9-01.

Viga S9-01	Tipo de Falla: Madera
MR: 26.9 MPa	Observaciones: Inclínación de fibra marcada
	

The table contains two rows of text and a large image area. The first row identifies the beam as 'Viga S9-01' and the failure type as 'Tipo de Falla: Madera'. The second row provides the Modulus of Rupture (MR) as '26.9 MPa' and notes 'Observaciones: Inclínación de fibra marcada'. The image area below the table consists of two photographs of wood grain. The top photograph shows a close-up of wood fibers that are curved and inclined. The bottom photograph shows a similar view with a more pronounced dark stain or crack following the fiber's path. To the left of the bottom photograph is a schematic diagram of a beam cross-section. It features a vertical orange line representing the beam's axis, with two blue dots at the top and one at the bottom. A red arrow points to the right from the bottom blue dot. At the bottom of the diagram, there is a blue and white striped diamond shape on a green horizontal line, representing a joint or support.

Tabla 7-13: Detalle viga S10-03.


Viga S10-03	Tipo de Falla: Unión Endentada
MR: 37.2 MPa	Observaciones: Dientes limpios en la zona izquierda.
 The image shows a close-up of a wood joint failure. On the left, a schematic diagram illustrates the joint with a red arrow pointing to the left, indicating the direction of the applied load. The main photograph shows two wooden beams joined together. The upper beam is a solid piece of wood, while the lower beam is a laminated beam composed of many thin layers. The joint is a finger joint, and the failure is a clean pull-out of the fingers from the lower beam. The left side of the joint shows clean, sharp edges, while the right side shows a more jagged and broken appearance.	

Tabla 7-14: Detalle viga S11-03.

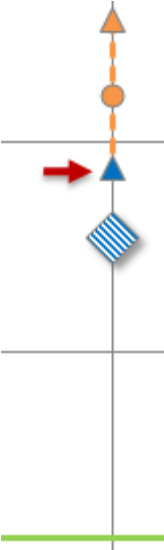
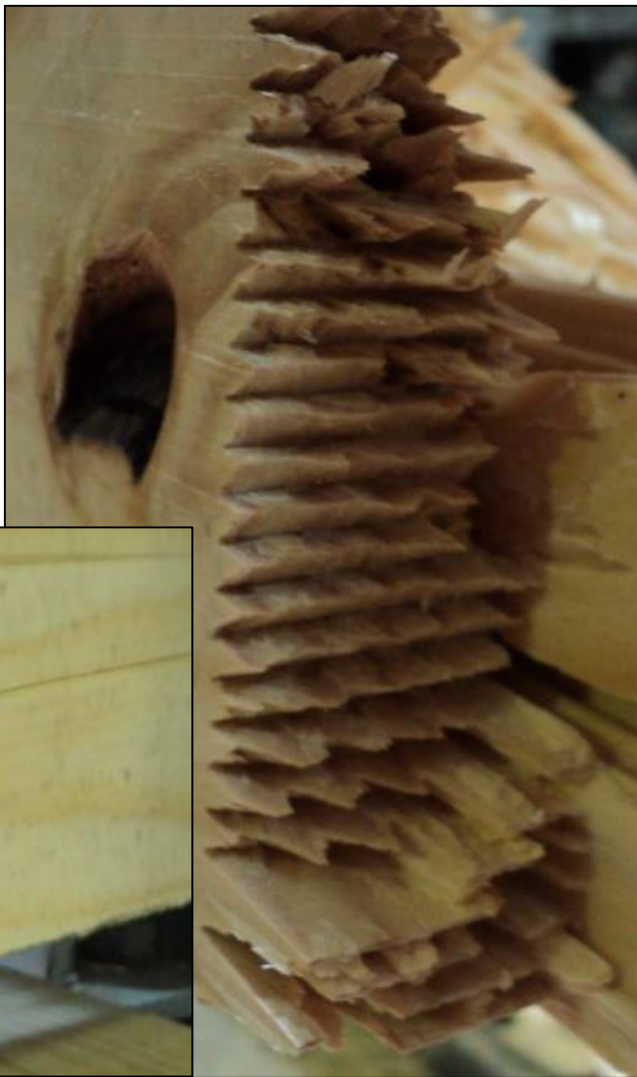

<p>Viga S11-03</p>	<p>Tipo de Falla: Unión Endentada.</p>
<p>MR: 38.7 MPa</p>	<p>Observaciones: Unión endentada funcionó bien más no excelente.</p>
<p style="text-align: center;">Fotos</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div>	

Tabla 7-15: Detalle viga S12-03.

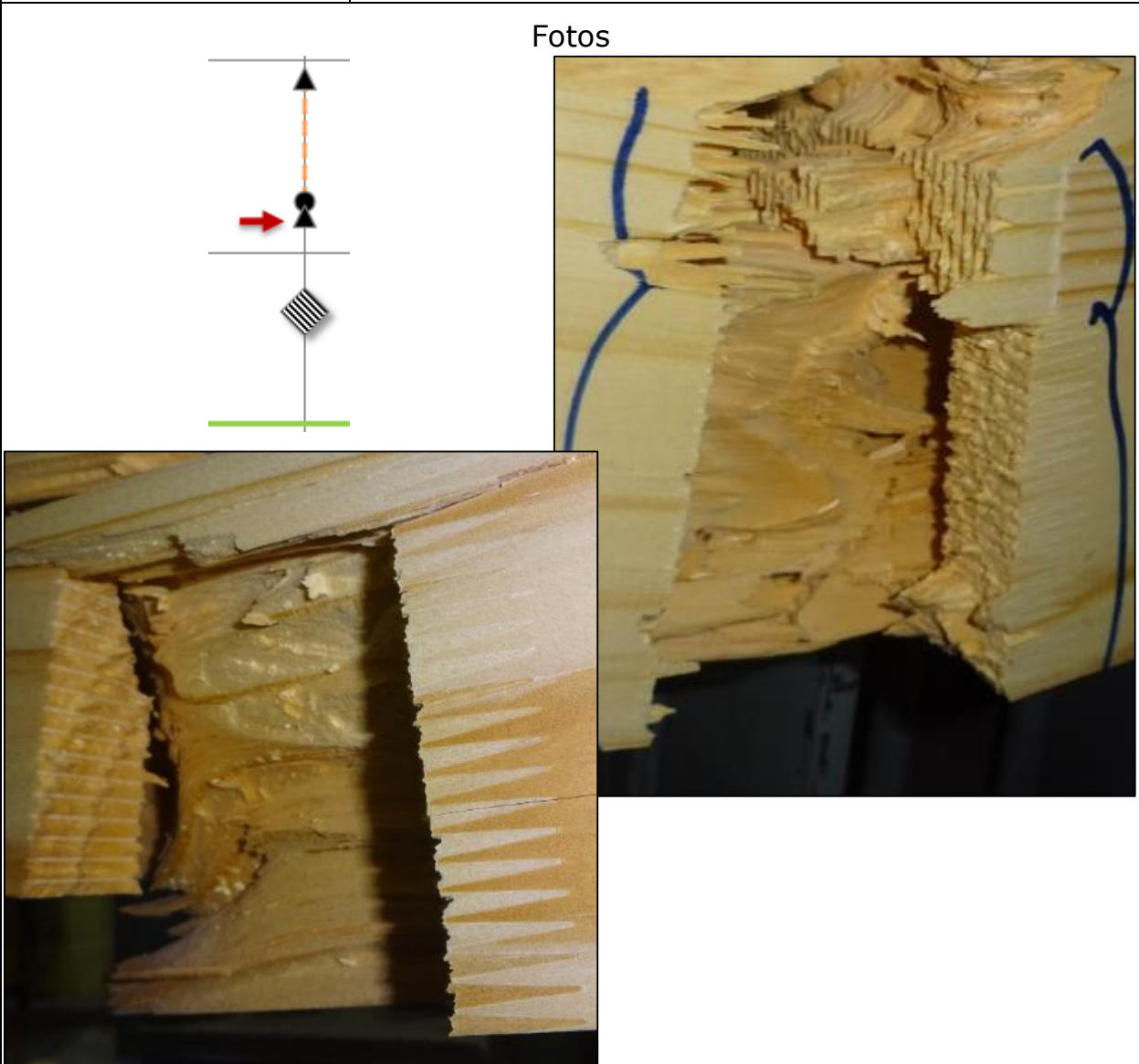
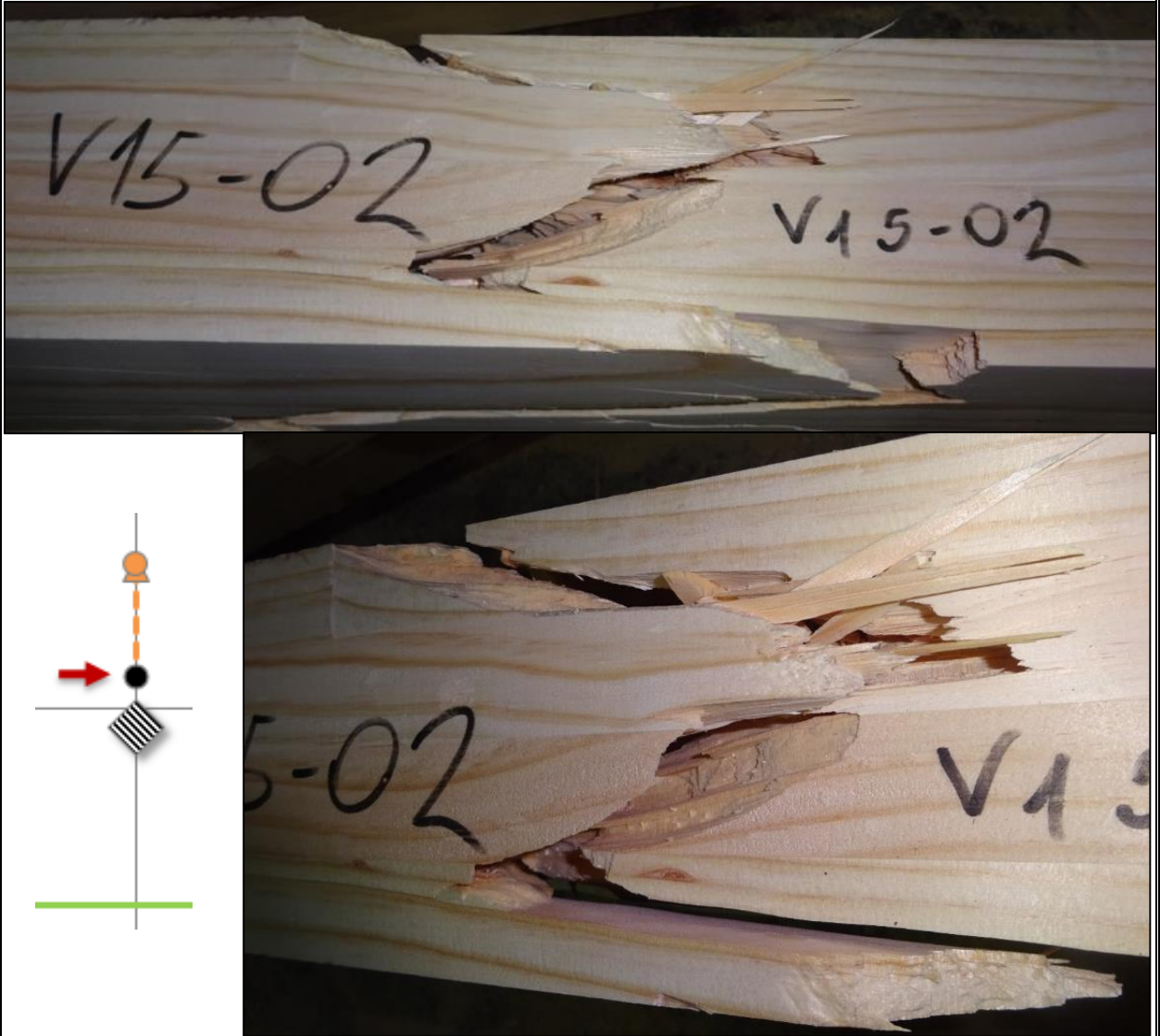
Viga S12-03	Tipo de Falla: Unión endentada por madera.
MR: 31.9 MPa	Observaciones: Inicio de falla por unión endentada. Unión endentada funcionó como es de esperarse.
<p style="text-align: center;">Fotos</p>  <p>The figure contains three visual elements: a schematic diagram and two photographs. The schematic diagram shows a vertical assembly with a top horizontal line, a dashed orange arrow pointing up, a black dot, a red arrow pointing right, a hatched diamond shape, and a bottom horizontal line. The top photograph shows a wood joint with blue curved arrows indicating the failure path. The bottom photograph is a close-up of the joint's edge, showing the wood grain and the failure surface.</p>	

Tabla 7-16: Detalle viga S13-02.

Viga S13-02	Tipo de Falla: Madera
MR: 31.4 MPa	Observaciones: Madera
Fotos	
	

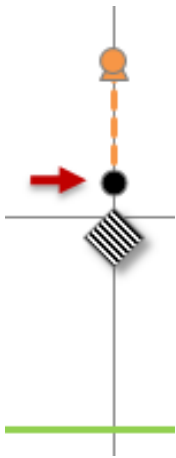


Tabla 7-17: Detalle viga S14-02.

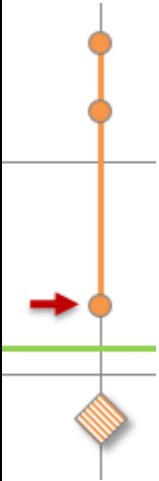


Viga S14-02	Tipo de Falla: Madera
MR: 23.2 MPa	Observaciones: Dos nudos alineados grandes. Los nudos abarcan un 46% de la lámina. Inclinción de fibra pronunciada.
Fotos	
	 

Tabla 7-18: Detalle viga S15-03.


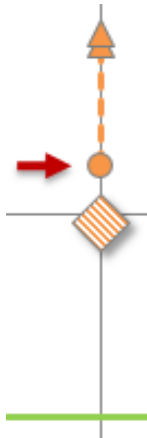

Viga S15-03	Tipo de Falla: Madera
MR: 32.1 MPa	Observaciones: Falla madera última lámina.
Fotos	
	
	

Tabla 7-19: Detalle viga S2B-05.

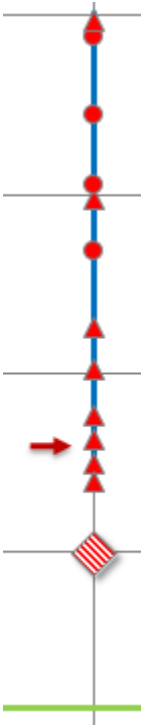


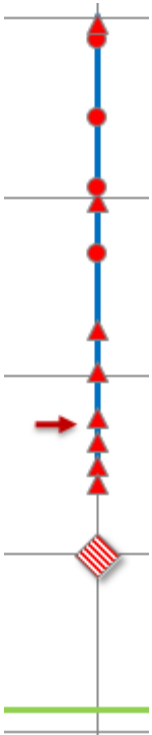

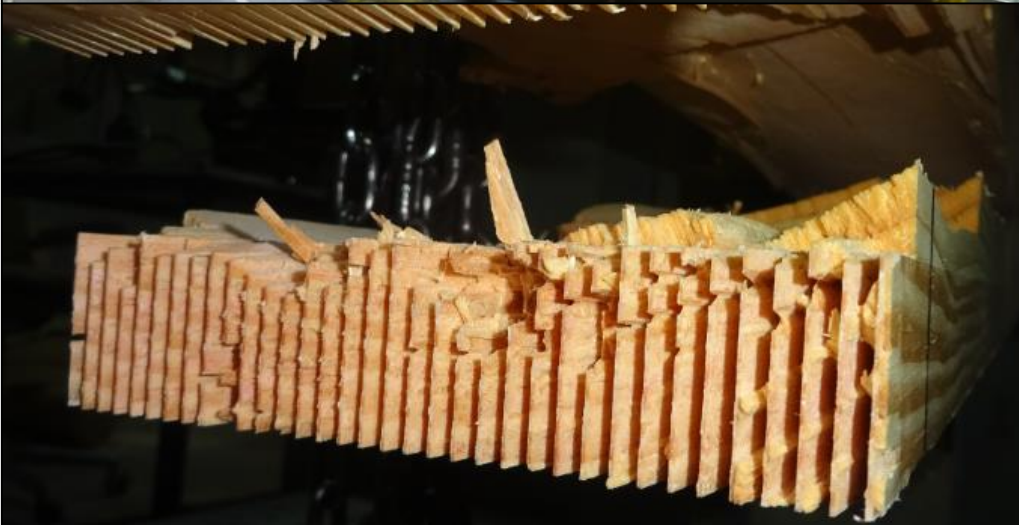
Viga S2B-5	Tipo de Falla: Unión Endentada
MR: 36.3 MPa	Observaciones: Uniones endentadas limpias
	<p data-bbox="876 441 974 483">Fotos</p>  

Tabla 7-20: Detalle viga S2-06.

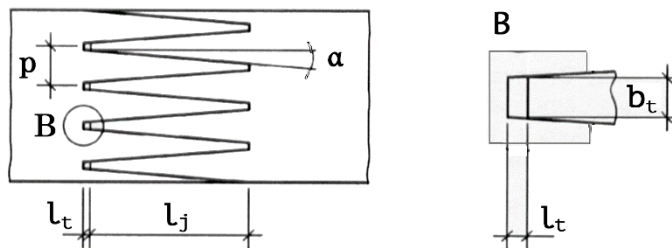
Viga S2-06	Tipo de Falla: Unión Endentada
MR: 37.6MPa	Observaciones: Dientes limpios
Fotos	
	 

Es así como la mayoría de las probetas que menos resistieron fueron por uniones endentadas defectuosas. De las 19 fallas mostradas en esta sección, 12 fueron por unión endentada, correspondiente a un 63%, y 4 fueron por inclinaciones de fibra pronunciadas (21%). Por lo cual a estas dos características hay que tomarle especial énfasis ya que su presencia se condice con resistencias bajas.

Análisis de uniones endentadas

Se procedió a medir las principales dimensiones de las uniones. El esquema patrón se presenta a continuación.

Figura 7-1: Elementos y designaciones geométricas de un perfil típico del empalme dentado.



Referencia: EN 14080: 2013

- Donde:
- l_j largo de diente
 - ρ paso del diente
 - α inclinación cara lateral del diente
 - l_t holgura del diente
 - b_t ancho de la punta del diente

Tabla 7-21: Comparación dimensiones Uniones endentadas norma europea con vigas fabricadas.

	Largo de diente l_j	Paso de diente ρ	Ancho de punta de diente b_t
	mm	mm	mm
EN 14080:2013	15	3,8	0,42
Vigas Fabricadas	16	3,8	-

Como se aprecia en la Tabla 7-21, las dimensiones de las uniones endentadas son similares, lo que indica que la baja calidad de las uniones no se debe mayormente a su diseño sino más bien a su producción. Por lo cual se debe tener especial cuidado en la materialización e inspección de estas uniones ya sea, entre otras cosas, en la cantidad de adhesivo utilizado, presión de la máquina o nivel de suciedad.

Análisis de inclinaciones de fibra marcadas

Se aprecia que hay un 21% de probetas que menos resistieron por serie que fallaron a causa de inclinaciones de fibra marcadas o con alta curvatura, por lo cual es necesario prestar atención a una posible falta de calibración o a deficiencias en la identificación de este tipo de características del equipo que clasifica las láminas.

Un mayor análisis no se realiza en este trabajo de título.

7.2.2 Comparación valores característicos

La magnitud del percentil asociado al 5%, toma en cuenta tanto los valores promedio de resistencia como la dispersión de estos. A menor cantidad de datos, a menor valor promedio y a mayor dispersión de los datos, la resistencia es drásticamente castigada. Transformándose así en una herramienta efectiva a la hora de comparar las series. Para más información sobre el cálculo de la resistencia característica, dirigirse al Apéndice A: Cálculo del valor estadístico asociado al percentil 5%.

A continuación en la Tabla 7-22, se aprecia el módulo de rotura característico, MR_k , para cada serie, en la que también se presentan barras anaranjadas que van cambiando de tamaño. Aquellas barras corresponden a un formato condicional realizado en Excel y que cuyo patrón de comparación es la serie 1 que corresponde a la manera actual de fabricar vigas de MLE en Arauco S.A. En la tabla se aprecia que la serie 1 obtuvo un MR_k de 21,2 MPa y la serie 2 de 29,9 MPa, la diferencia porcentual es de 41% y por lo tanto, la barra anaranjada de la tabla correspondiente a la serie 2 es un 41% más grande que la barra de la serie 1. Para las demás series se toma en todos los casos a la Serie 1 como el valor de referencia.

Estas dos series 1 y 2, fueron las únicas conformadas por más de 3 probetas (ver Tabla 5-1) por lo que corresponden a las series con los resultados de menor incertidumbre y por lo tanto, con los datos más confiables.

De acuerdo a la Tabla 2-5 y a la Tabla 2-4 de la sección Presentación, cabe destacar que las láminas más resistentes siguen el siguiente orden: **MGP12**-**MGP10**-Grado A-Grado B. Por lo cual es natural pensar que las vigas con una composición mayor de MGP12 resistirán más que las que tienen mayor proporción de Grado B.

Tabla 7-22: Módulos de rotura característicos.

	Tipo de Lam.	Composición	MR característico (5%) [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 1	LH	A - B - A	21,2	100%
Serie 2	LH	MGP 12 - MGP 10 - MGP 12	29,9	141%
Serie 3	LH	MGP 12 - B - MGP 12	16,4	77%
Serie 4	LH	MGP 10 - MGP 12	21,5	101%
Serie 5	LH	B - MGP 12	28,4	134%
Serie 6	LVZFT	MGP 12 - MGP 10 - LV MGP 12	41,4	195%
Serie 7	LVZFT	MGP 10 - LV MGP 12	39,5	186%
Serie 8	LH	MGP 10 - MGP 10 - MGP 10	35,2	166%
Serie 9	LH	MGP 10 - B - MGP 10	21,0	99%
Serie 10	LH	B - MGP 10	34,4	162%
Serie 11	LVZFT	B - LV MGP 10	35,4	167%
Serie 12	LVZFT	A - B - LV A	27,0	127%
Serie 13	LVZFT	B - LV A	29,2	138%
Serie 14	LH	B - B - B	17,9	84%
Serie 15	LVZFT	B -LV B	29,6	140%

En la Tabla 7-22 la segunda columna se refiere al tipo de laminación que puede ser laminación horizontal (LH) o laminación vertical en zona flexotraccionada (LVZFT).

Beneficios de láminas de grados estructurales mecánicos MGP

Ya se afirmó que al cambiar de la serie 1 a la 2, se observaba un aumento de la resistencia característica **de un 41%**. Ahondando más en las diferencias de ambas vigas se tiene que la serie 2 corresponde a una viga de laminación horizontal con la totalidad de sus láminas de grados estructurales mecánicos, se compone por dos láminas MGP12, seis láminas MGP10 y dos láminas MGP12. En cambio, la serie 1 se compone bajo la misma proporción pero con láminas Grado A, Grado B y Grado A, de clasificación visual. El incremento de resistencia encontrado al comparar la serie 2 con la 1 está fundado en el aumento de la resistencia de las láminas utilizadas y significa una mejora en la resistencia característica de las vigas con laminación horizontal si es que se incluyen las calidades de láminas descritas, MGP12 y MGP10.

Por otro lado, si se compara la serie 12 que es la versión laminación vertical en zona flexotraccionada de la serie patrón 1, con la tipología de serie 6, versión laminación vertical en zona flexotraccionada de la serie 2, la resistencia característica obtenida fue de 27 MPa versus 41,4 MPa, correspondiendo a un **aumento del 54%** en resistencia.

Este efecto se aprecia con la misma tendencia si es que se compara cualquiera de las series 12, 13 y 15 con alguna de las series 6, 7 y 11, todas con laminación vertical en zona flexotraccionada.

Se concluye finalmente, que la **incorporación de láminas de grados estructurales mecánicos MGP** desembocará en un aumento importante de resistencia característica, teniéndose **incrementos** de entre un **40% y un 50%**, ya sea en vigas con laminación horizontal o en vigas con laminación vertical en zona flexotraccionada. Si la viga es de laminación horizontal, el aumento es más cercano al 40% y si la viga es de laminación vertical en la zona flexotraccionada, al 50%.

Efectos de la incorporación de láminas dispuestas verticalmente en el sector flexotraccionado

El efecto laminación vertical en cuarto inferior, es el aumento de la resistencia a flexión característica de una viga debido a la disposición de láminas verticalmente en la zona flexotraccionada (Figura 2-2) (Sandoz, 1996).

En la Tabla 7-23 se presenta la comparación de las resistencias características de vigas de igual calidad de láminas pero con distinta laminación. Las series escogidas fueron la 1, 2, 4, 10 y 14, que se contrastan con la 12, 6, 7, 11 y 15, respectivamente. Esta tabla se complementa con la Figura 5-1 y Figura 5-2.

Tabla 7-23: Magnitudes del MRk para cuantificar el efecto laminación vertical en cuarto inferior.

	Composición	Coef. Variación MR [%]	MR característico (5%) [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 1	A - B - A	17%	21,2	100%
Serie 12	A - B - LV A	11%	27,0	127%
Serie 2	MGP 12 - MGP 10 - MGP 12	20%	29,9	100%
Serie 6	MGP 12 - MGP 10 - LV MGP 12	5%	41,4	139%
Serie 4	MGP 10 - MGP 12	28%	21,5	100%
Serie 7	MGP 10 - LV MGP 12	5%	39,5	184%
Serie 10	B - MGP 10	7%	34,4	100%
Serie 11	B - LV MGP 10	8%	35,4	103%
Serie 14	B - B - B	21%	17,9	100%
Serie 15	B - LV B	9%	29,6	165%
	Coef. Var. LH:	18,7%	Incremento global:	144%
	Coef. Var. LVZFT:	7,7%		

En la Tabla 7-23, se aprecia que en cinco de seis comparaciones (se excluye la comparación de la Serie 10 con la Serie 11) el coeficiente de variación (C_v) disminuye considerablemente al utilizar laminación vertical en el borde flexotraccionado. Cuantitativamente, el promedio de los C_v para las series 1, 2, 4, 10 y 14 es de 18,7% y para las series 12, 6, 7, 11 y 15 es de 7,7%.

$$\text{Disminución porcentual de } C_v \text{ por LVZFT} = \frac{C_v(LVZF)}{C_v(LH)} = \frac{7,7\%}{18,7\%} = 0,41 \quad (7-1)$$

Diferencia que representa una disminución del coeficiente de variación a un 41% y que coincide con lo observado en otros estudios similares (Sandoz, 1996) en el cual la variabilidad de los datos disminuyó en un cincuenta por ciento gracias a la incorporación de cuatro láminas verticales en la zona inferior tal como las vigas LVZFT de este proyecto.

En cuanto a la comparación de la resistencia a flexión característica, se observa que las vigas de láminas A-B-A, serie 1, al incluir en el cuarto inferior láminas verticales, serie 12, representando un aumento de 27% en resistencia.

$$\frac{MR_{f,k,A-B-LVA,(s12)}}{MR_{f,k,A-B-A,(s1)}} = \frac{27,0}{21,2} = 1,27 \quad (7-2)$$

En el caso de las vigas compuestas de láminas de calidad MGP12-MGP10-MGP12, serie 2, al incluir en su producción el cuarto inferior de manera vertical, serie 6, representando un 39% de mejora en resistencia.

$$\frac{MR_{f,k,12-10-LV12,(s6)}}{MR_{f,k,12-10-12,(s2)}} = \frac{41,4}{29,9} = 1,39 \quad (7-3)$$

Para los demás casos de la tabla, el aumento en resistencia se da para todas y cada una de las comparaciones por igual calidad de láminas. Siendo el mayor incremento al comparar la serie 4 y 7 (84%) y el menor al comparar la serie 10 y 11 (3%).

$$\frac{MR_{f,k,10-LV12,(s7)}}{MR_{f,k,10-12,(s4)}} = \frac{39,5}{21,5} = 1,84 \quad (7-4)$$

$$\frac{MR_{f,k,B-LV10,(s11)}}{MR_{f,k,B-10,(s10)}} = \frac{35,4}{34,4} = 1,03 \quad (7-5)$$

$$\frac{MR_{f,k,B-B-LVB,(s15)}}{MR_{f,k,B-B-B,(s14)}} = \frac{29,6}{17,9} = 1,65 \quad (7-6)$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que la incorporación de láminas verticales en el cuarto inferior de la viga, aumenta definitivamente la resistencia característica a flexión. Se procede entonces a calcular el incremento de fabricar vigas con laminación vertical en la zona inferior, para lo cual se sigue el siguiente análisis:

Al promediar el porcentaje de aumento de la resistencia para cada una de las cinco comparaciones, se obtiene un incremento global de un 44%, presente al final de la Tabla 7-23. Pero este promedio trae consigo intrínsecamente la validación de los datos de cada una de las series que se compararon, y como se ve en el Gráfico 6-1, las series con laminación horizontal contienen una alta dispersión de sus resultados, causando que el aumento de calidad de láminas en el incremento no se exprese marcadamente en la calidad de las vigas.

Se prosigue entonces, a reducir esta incertidumbre al apartar del cálculo del incremento global a las series compuestas por sólo tres probetas, series 7, 11 y 15, y asumir como verídicos los valores para las series de más de tres probetas.

En otras palabras, validar el incremento de resistencias características a flexión sólo para las series 1 y 2, al compararlas con las series 12 y 6 respectivamente.

Otra justificación posible, es que las series de 3 probetas están asociadas a un coeficiente mayor que multiplica la desviación estándar al realizar el cálculo del valor asociado al percentil del 5%, MR_k . Por lo que si además se tienen datos más dispersos, el castigo crece considerablemente que en el caso de seis o más probetas. Lo anterior se complementa con la fórmula de resistencia característica asociada al percentil del 5% presente en el Apéndice A: Cálculo del valor estadístico asociado al percentil 5%.

Se continúa entonces a validar únicamente el incremento de la resistencia de las series de series 1 y 2, resultando en un 27% para la primera y un 39% para la segunda. Por lo que el incremento fue superior al utilizar láminas de mayor resistencia, e inferior al utilizar láminas de una resistencia menor.

Así pues, el **efecto por laminación vertical en zona inferior** corresponde a un **incremento de la resistencia característica que se encuentra entre un 30% y un 40%** para igual calidad de láminas. Lo que se encuentra en la misma línea, pero con valores menores, de lo observado por Sandoz (Sandoz, 1996) donde el aumento fue de entre 40 y 60%.

Finalmente, **si además de fabricar vigas con laminación vertical en el cuarto inferior también se reemplazan las láminas por calidades MGP**, el incremento en resistencia característica a flexión entrega valores cercanos al **95%**. Tal como se aprecia al comparar la serie 1 con la serie 6, y que corresponde a un aumento de resistencia notable al incrementarse el MR característico de 21,2 a 41,4 MPa (Tabla 7-24).

Tabla 7-24: Incremento en resistencia a flexión al incorporar ambas mejoras.

	Composición	MR característico (5%) [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 1	A - B - A	21,2	100%
Serie 6	MGP 12 - MGP 10 - LV MGP 12	41,4	195%

Efecto asimetría

Nótese en la Figura 5-1, que las series 4, 5 y 10 se construyen utilizando dos de sus láminas inferiores de una calidad superior al resto de las láminas. Se aprovecha este proyecto para incorporar estas series y encontrar qué consecuencia tiene la asimetría con los métodos de producción utilizados.

Investigaciones realizadas en el país han arrojado que la madera de Pino radiata resiste a tracción paralela entre un 50% y un 70% de la resistencia a compresión paralela (Tensiones admisibles y módulo de elasticidad para Pino radiata seco, INN, NCh 1198:2006). Por lo tanto, si tanto el sector inferior como el superior de una viga están conformados por la misma calidad de láminas, se está presente a una sobre resistencia en la zona superior y con ello un sobre costo de material. La solución a este problema son las vigas asimétricas, que siendo de menor costo de producción, debido a que se utiliza materia prima de menor calidad en el núcleo de la viga, se obtienen resistencias similares a las vigas simétricas.

Las series 4, 5 y 10 corresponden a la versión asimétrica de las series 2, 3 y 9, respectivamente. Por ello resulta interesante compararlas. Ver Tabla 7-25.

Tabla 7-25: MRk para cuantificar el efecto simetría, laminación horizontal.

	Composición	MR característico (5%) [Mpa]	Normalizado [%]	Diferencias
Serie 2	MGP 12 - MGP 10 - MGP 12	29,9	100%	
Serie 4	MGP 10 - MGP 12	21,5	72%	28%
Serie 3	MGP 12 - B - MGP 12	16,4	100%	
Serie 5	B - MGP 12	28,4	173%	-73%
Serie 9	MGP 10 - B - MGP 10	21,0	100%	
Serie 10	B - MGP 10	34,4	164%	-64%

La Tabla 7-25 representa la comparación entre series de vigas de igual calidad de láminas pero distinta simetría, debido a esto, se muestran los porcentajes contrastando exclusivamente las resistencias características entre las series 2-4, 3- 5 y 9-10

Si se compara la serie 2 con la serie 4, se ve que la asimetría no se tradujo en resistencias de magnitud similar. Representando la serie 4 un 72% de la resistencia de la serie 2.

Las resistencias características de la serie 3 y la serie 5 tampoco son de magnitudes similares ya que se aumentó la resistencia de un 100% a un 173%.

Tampoco las resistencias de la serie 9 y serie 10 son similares, manteniéndose el mismo comportamiento que las demás comparaciones.

En resumen, al comparar vigas con laminación horizontal simétricas se arrojan diferencias superiores al 28% contradiciendo lo que se declaró al principio de esta sección. Concluyéndose que mediante estos resultados el efecto de asimetría no está correlacionado bajo ningún criterio con la resistencia.

Claro está, que esto corresponde a una comparación únicamente de vigas con laminación horizontal. Y debido ello es que se propone la siguiente tabla:

Tabla 7-26: Efecto asimetría, vigas laminación vertical en cuarto inferior.

	Composición	MR característico (5%) [Mpa]	Normalizado [%]	Diferencias
Serie 6	MGP 12 - MGP 10 - LV MGP 12	41,4	100%	5%
Serie 7	MGP 10 - LV MGP 12	39,5	95%	
Serie 12	A - B - LV A	27,0	100%	-8%
Serie 13	B - LV A	29,2	108%	

En la Tabla 7-26, se aprecia la comparación entre los dos únicos pares de vigas con laminación vertical en zona inferior que tienen la misma calidad de láminas pero varían en su simetría. A diferencia de las series de laminación horizontal presentadas en la Tabla 7-26, ambos pares arrojaron resistencias características similares, con diferencias no más allá de un 8%. Gracias a que los resultados para las vigas con laminación vertical en zona flexotraccionada son más confiables que para las vigas con laminación horizontal, la conclusión propuesta de la página anterior ya no es válida y se concluye entonces que el efecto simetría sí está presente tal como se supuso desde un principio y supone resistencias similares para diferentes asimetrías.

Finalmente, para efecto de resistencia, si se desea fabricar vigas de igual resistencia pero de menor costo, lo ideal es fabricar vigas de laminación vertical en la zona inferior con tan sólo láminas de esta zona de una calidad superior al resto.

Láminas Grado A comparadas con láminas Grado B

Las láminas Grado A debieran ser de resistencia mayor a las láminas de Grado B, debido a que las primeras contienen menos defectos visuales tales como nudosidades que las segundas (Tabla 2-5).

En la supervisión del proceso de fabricación de las probetas, se supo que la diferencia entre las láminas Grado A y Grado B, está fundada solamente en el largo del block (ver sección: Descripción componentes viga de MLE) y no en su calidad o diferencias por defectos visuales.

En cuanto a los resultados de los ensayos, en el Gráfico 6-1 y Gráfico 7-1, se aprecia que las series únicamente conformadas por láminas clasificadas visualmente obtienen resistencias características similares.

Si se realiza una prueba de T Student (que debe ser mayor al 5%) se comprueba que en todas las comparaciones, la prueba entrega valores mayores a 5% (Tabla 7-27), ya sea para series con laminación horizontal o con laminación vertical en zona flexotraccionada.

Tabla 7-27: Prueba T Student series con láminas visuales.

		Prueba T Student
Laminación Horizontal	S1 - S14	95%
Laminación Vertical en Zona Flexotraccionada	S12 - S13	96%
	S12 - S15	69%
	S13 - S15	68%

Por lo que se comprueba que ambas calidades de láminas, Grado A y Grado B, para efectos de resistencias, son exactamente iguales.

7.3 Rigidez - Módulo de elasticidad

La rigidez corresponde a la cantidad de esfuerzo que puede adquirir un cuerpo consiguiendo la menor deformación posible. La manera de medir la rigidez es mediante a la medición de la deformación de un cuerpo al mismo tiempo que se registra la carga aplicada. La pendiente de este gráfico, el llamado Módulo de Elasticidad, nos entrega cuán rígido es el cuerpo, dentro del rango elástico.

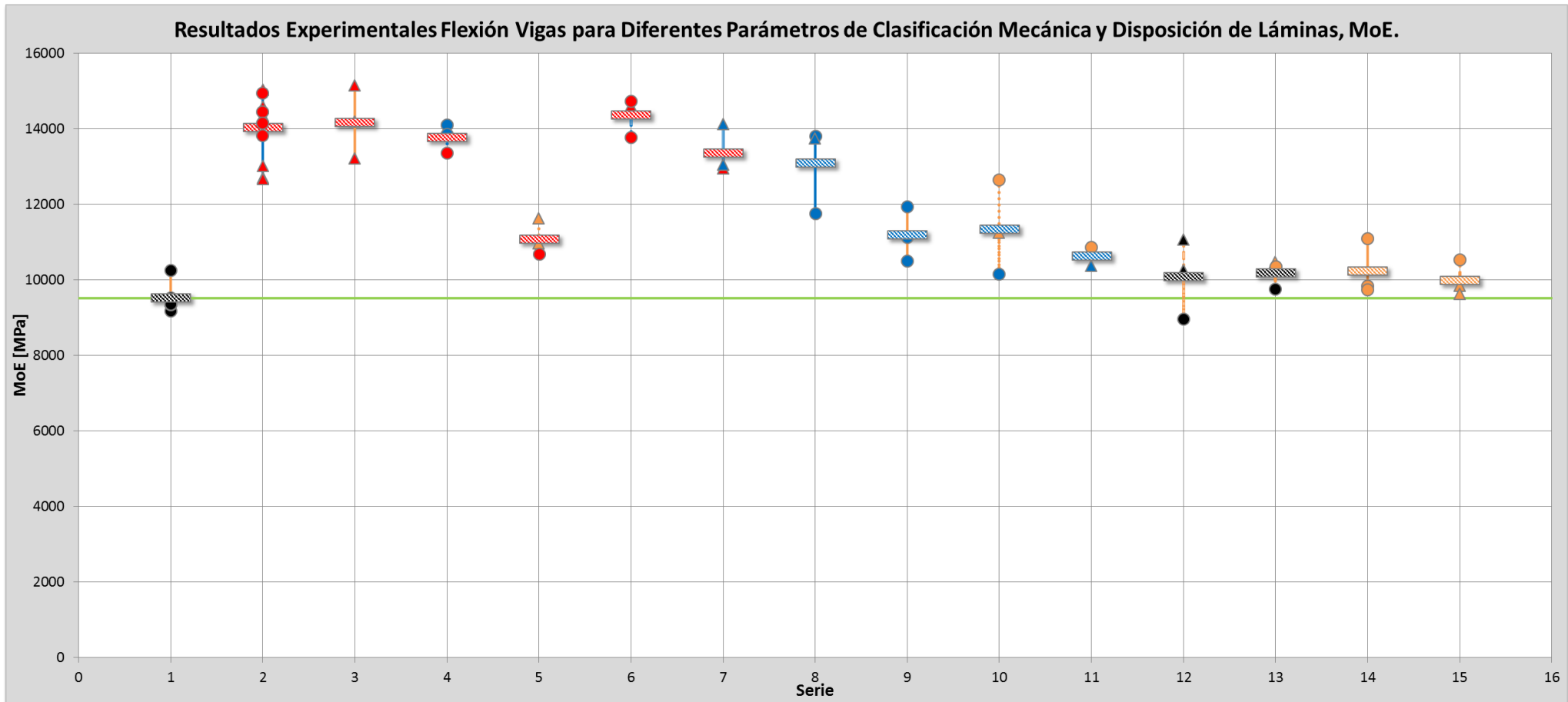
7.3.1 Análisis del modo de rotura en las vigas ensayadas

Para facilitar la observación de los resultados, se presenta nuevamente el gráfico del Módulo de Elasticidad para cada una de las Series, Gráfico 6-2, variando su numeración.

Observando los datos, se aprecia que a diferencia del gráfico de resistencia, Gráfico 7-1, la dispersión es menor entre probetas de una misma serie.

La línea verde corresponde al eje de referencia impuesto por el módulo de elasticidad promedio de la serie 1.

Gráfico 7-3: Resultados experimentales Módulo de Elasticidad para todas las series.



Fuente: Elaboración Propia.

Al observar el Gráfico 7-3, no se aprecia un claro aumento de rigidez de las series con diferentes tipos de laminación. En cambio, se ve que la rigidez de las vigas es directamente proporcional a la calidad de sus láminas. Teniéndose un orden perfecto de las rigideces características de las series según lo esperado: MGP12 > MGP10 > Grado A > Grado B. Exceptuando la serie 5.

En cuanto al modo de falla de cada probeta, se obtiene la misma conclusión que se vio en la discusión por resistencia: las series con láminas MGP12, y laminación horizontal (series 2, 3, 4 y 5), contienen más fallas por uniones endentadas que el resto de las series.

Sin embargo, no se observa una relación directa de fallas ya sea por uniones endentadas o por madera, con bajas rigideces.

Ya abarcado lo anterior, se procede a cuantificar el aumento de rigidez debido al uso de láminas de grados estructurales mecánicos MGP.

7.3.2 Comparación valores característicos

A continuación, en la Tabla 7-28, se presentan los valores de los Módulos de Elasticidad promedios, que corresponden a la propiedad mecánica característica en cuanto a rigidez de cada serie de vigas. Los valores de la Tabla 7-28 se complementan con lo mostrado en el Gráfico 7-3.

Tabla 7-28: Módulos de Elasticidad característicos y Cv para cada una de las series

	Tipo de Lam.	Composición	Coef. Variación E [%]	E promedio [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 01	LH	A / B / A	4%	9518	100%
Serie 02	LH	MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	6%	14049	148%
Serie 03	LH	MGP 12 / B / MGP 12	7%	14176	149%
Serie 04	LH	MGP 10 / MGP 12	3%	13775	145%
Serie 05	LH	B / MGP 12	4%	11091	117%
Serie 06	LVZF	MGP 12 / MGP 10 / T MGP 12	4%	14373	151%
Serie 07	LVZF	MGP 10 / T MGP 12	5%	13368	140%
Serie 08	LH	MGP 10 / MGP 10 / MGP 10	9%	13105	138%
Serie 09	LH	MGP 10 / B / MGP 10	6%	11200	118%
Serie 10	LH	B / MGP 10	11%	11353	119%
Serie 11	LVZF	B / T MGP 10	2%	10642	112%
Serie 12	LVZF	A / B / T A	11%	10090	106%
Serie 13	LVZF	B / T A	4%	10197	107%
Serie 14	LH	B / B / B	7%	10235	108%
Serie 15	LVZF	B / T B	5%	10002	105%

En primer lugar, se aprecia que los coeficientes de variación obtenidos son menores que los que los obtenidos para los resultados de la resistencia característica a flexión. En esta misma línea, tampoco se observa un cambio significativo de variabilidad de datos dependiendo del tipo de laminación.

Dentro de las vigas con laminación horizontal, la comparación de la serie 1 con la serie 2, resulta en un aumento de rigidez de 48%, al contrastar un módulo de elasticidad promedio de 9518 con 14049 MPa.

Por otro lado, si se compara la serie 12 que es la versión laminación vertical en zona flexotraccionada de la serie patrón 1, con la serie 6, versión laminación vertical en zona flexotraccionada de la serie 2, el módulo de elasticidad promedio obtenido fue de 10090 MPa versus 14373 MPa, correspondiendo a un aumento de 42%.

Por lo que el **aumento de rigidez al incorporar láminas MGP** es el promedio entre 48% y 42%, en otras palabras, **a 45%**.

Tabla 7-29: Comparación vigas laminación vertical en borde flexotraccionado, MoE.

	Composición	Coef. Variación E [%]	E promedio [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 1	A / B / A	4%	9518	100%
Serie 12	A / B / T A	11%	10090	106%
Serie 2	MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	6%	14049	100%
Serie 6	MGP 12 / MGP 10 / T MGP 12	4%	14373	102%
Serie 4	MGP 10 / MGP 12	3%	13775	100%
Serie 7	MGP 10 / T MGP 12	5%	13368	97%
Serie 10	B / MGP 10	11%	11353	100%
Serie 11	B / T MGP 10	2%	10642	94%
Serie 14	B / B / B	7%	10235	100%
Serie 15	B / TB	5%	10002	98%

Como se aprecia en la Tabla 7-29, las diferencias en el Módulo de Elasticidad al cambiar el tipo de laminación no son mayores que 6%, por lo que no son significativas.

En conclusión en términos de rigidez no hay mayores cambios al incorporar laminación vertical en zona inferior, sin embargo, al utilizar láminas de grados estructurales mecánicos se aprecia un incremento importante del **Módulo de Elasticidad promedio que se encuentra cercano al 45%**

Finalmente, si además de fabricar vigas con laminación vertical en la zona flexotraccionada se incorporan láminas MGP, el incremento en módulo de elasticidad promedio entrega valores cercanos al **50%**. Tal como se aprecia al comparar la serie 1 con la 6, y que corresponde a un aumento de rigidez al incrementarse el MoE promedio de 9518 a 14373 MPa (Tabla 7-30).

Tabla 7-30: Incremento del Módulo de Elasticidad al incorporar ambas mejoras.

	Composición	E promedio [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 1	A / B / A	9518	100%
Serie 6	MGP 12 / MGP 10 / T MGP 12	14373	151%

7.4 Modelos de predicción de resistencia

Dentro de este capítulo se calcula y discuten los valores que entregan los modelos de predicción europeos.

7.4.1 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de las láminas fueron tomadas de documentos realizados con Arauco S.A (Wagner, Caracterización Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12 de aserraderos de Arauco, 2013) en cuanto a la resistencia de láminas y de los antecedentes de ensayos de uniones endentadas presentes en este documento para los datos de la resistencia a flexión de las uniones.

Cabe destacar que ambos valores característicos están asociados al percentil del 95% y nivel de confianza del 75% como se explica en el Apéndice A: Cálculo del valor estadístico asociado al percentil 5%.

Tabla 7-31: Valores propiedades mecánicas láminas y uniones endentadas MGP12.

	Resistencia láminas	Resistencia uniones endentadas
MGP12	$f_{t,0,l,k} = 20,6 [MPa]$	$f_{m,j,k} = 37,2 [MPa]$

7.4.2 Cálculo resistencia característica viga MLE, norma EN 1480 (2013)

El resultado del cálculo presente a continuación se compara con los resultados experimentales obtenidos para la tipología de serie 2: MGP12-MGP10-MGP12.

Utilizando los valores para láminas MGP12, primero se calcula la resistencia de la viga como si fuese homogénea de calidad MGP12. Respetando los límites que se imponen a la resistencia a flexión de las uniones endentadas, Ecuación (7-7).

$$1,4 \cdot f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1,4 \cdot f_{t,0,l,k} + 12 \quad (7-7)$$

$$28,8 [MPa] \leq 37,2 [MPa] \leq 40,8 [MPa] \quad (7-8)$$

Reemplazando, se obtiene que el valor de la resistencia a flexión de uniones endentadas se encuentra entre los límites impuestos, Ecuación (7-8).

Se procede a calcular la resistencia a flexión de la viga de MLE.

$$f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5 \cdot (f_{t,0,l,k})^{0,75} + 1,5 \cdot \left(\frac{f_{m,j,k}}{1,4} - f_{t,0,l,k} + 6 \right)^{0,65} \quad (7-9)$$

$$= -2,2 + 2,5 \cdot (20,6)^{0,75} + 1,5 \cdot \left(\frac{37,2}{1,4} - 20,6 + 6 \right)^{0,65} \quad (7-10)$$

$$f_{m,g,k} = 29,5 [MPa] \quad (7-11)$$

El resultado anterior corresponde a la resistencia a flexión característica de una viga de MLE compuesta completamente de láminas de calidad MGP12.

Esta metodología se encuentra en línea con lo calculado en la memoria de título de Cristóbal Tapia, (Tapia, 2015).

Para el cálculo de la resistencia para una viga MGP12-MGP10-MGP12 se debe multiplicar lo obtenido por el factor de momento de inercia transformado, T_I , que se obtiene mediante la Ecuación (7-15). Los valores de los módulos de elasticidad, E , en este caso, se obtienen de valores experimentales, (Wagner, Caracterización Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12 de aserraderos de Arauco, 2013).

$$T_I = \frac{E_{b,MGP12} * h_{MGP12}^3 - (E_{b,MGP12} - E_{b,MGP10}) * h_{MGP10}^3}{E_{b,MGP12} * h_{MGP12}^3} \quad (7-12)$$

$$= \frac{15000 * 300^3 - (15000 - 12250) * 180^3}{15000 * 300^3} \quad (7-13)$$

$$T_I = 0,96 \quad (7-14)$$

Los módulos de elasticidad anteriores, pueden reemplazarse por los valores que describe la normativa chilena NCh 1198.

$$T_I = \frac{12700 * 300^3 - (12700 - 10000) * 180^3}{15000 * 300^3} \quad (7-15)$$

$$T_I = 0,954 \quad (7-16)$$

Como ambos valores son similares, se escoge el resultado asociado a los datos de norma NCh 1198: $T_I = 0,954$.

Ya con el valor para T_I , se multiplica con la resistencia de la viga homogénea, $29,5 [MPa]$, para obtener la resistencia para la serie 2 mediante los modelos de predicción EN 1480 (2013):

$$MR_{k,EN1480(2013)} = T_I \cdot f_{m,g,k} = 0,954 \cdot 29,5 = 28,15 [MPa] \quad (7-17)$$

7.4.3 Cálculo resistencia característica viga MLE, norma EN 1194 (1999)

De acuerdo a la ecuación presenten en la norma EN 1194, se tiene la siguiente ecuación:

$$f_{m,g,k} = \min(7 + 1,15 \cdot f_{t,0,l,k} \quad , \quad 0,75 \cdot f_{m,j,k}) \quad (7-18)$$

$$= \min(7 + 1,15 \cdot 20,6 \text{ [MPa]}, \quad 0,75 \cdot 37,2 \text{ [MPa]}) \quad (7-19)$$

$$= \min(30,69 \text{ [MPa]} \quad , \quad 27,9 \text{ [MPa]}) \quad (7-20)$$

$$f_{m,g,k} = 27,9 \text{ [MPa]} \quad (7-21)$$

Al multiplicar la resistencia calculada por el factor de modificación por inercia, $T_I = 0,954$, se obtiene:

$$MR_{k,EN1194(1999)} = T_I \cdot f_{m,g,k} = 0,954 \cdot 27,9 = 26,62 \text{ [MPa]} \quad (7-22)$$

7.4.4 Comparación resultados experimentales con analíticos

Para realizar la comparación, se calcula el valor experimental que corresponde a la resistencia a flexión característica de la tipología con láminas de calidad MGP12-MGP10-MGP12.

Tabla 7-32: Datos series 2 y 2B juntas.

					75 % Confiabilidad
					MR característico (5%) (.75) [Mpa]
	Nombre	MR [Mpa]	Nombre	MR [Mpa]	
Serie 2 MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	S2-01	☉ 42,5	S2B-01	● 58,84	26,57
	S2-02	○ 34,9	S2B-02	☉ 54,42	
	S2-03	☐ 49,8	S2B-03	● 59,71	
	S2-04	○ 33,9	S2B-04	☉ 40,15	
	S2-05	☐ 46,8	S2B-05	○ 36,29	
	S2-06	○ 37,6	S2B-06	● 50,50	

Recordando que ambas series son de la misma familia, el módulo de rotura característico asociado al percentil del 5% calculado con un 75% de confianza corresponde a 26,57 MPa (Tabla 7-32) (Ver cálculo en Apéndice A: Cálculo del valor estadístico asociado al percentil 5%).

$$\frac{MR_{k,EN1480(2013)}}{MR_{k,empírico}} = \frac{28,15}{26,57} = 1,06 \text{ y } \frac{MR_{k,EN1194(1999)}}{MR_{k,empírico}} = \frac{26,62}{26,57} = 1,002 \quad (7-23)$$

Se observa que el valor analítico es levemente superior en ambos casos, EN1480(2013) y EN1194(1999), al valor empírico, siendo la actual normativa la que ofrece predicciones más elevadas. Aun así la diferencia es pequeña (6% y 0,2%), por lo que concluye que ambos modelos de predicción pueden ser usados satisfactoriamente para el cálculo de la resistencia característica a flexión de vigas de MLE chilenas.

Capítulo 8 Conclusiones

Cabe destacar que el número de ensayos realizados en el contexto de este trabajo de investigación condiciona que las conclusiones tengan un carácter esencialmente estimativo para la mayor parte de los parámetros analizados, resultando sin embargo un primer antecedente referencial relativo a las tendencias apreciadas en las distintas series experimentales. El poder alcanzar mayores certezas requerirá de ensayos adicionales y del apoyo de series experimentales virtuales simuladas por medio de modelaciones analíticas de vigas de madera laminada encolada utilizando el método de elementos finitos. En lo siguiente se comentarán los aspectos que a juicio de este investigador revisten mayor relevancia.

En relación a la muestra referencial: Serie 01

Como muestra referencial de las capacidades mecánicas consideradas en este estudio se consideró la serie de 6 ensayos con vigas estándar, esto es, de dimensiones normalizadas (135mm*300 mm*6,00 m) fabricadas con madera aserrada de pino radiata clasificada en los Grados Visuales A y B definidos en la norma NCh 2150 y que refleja las características del material que se produce actualmente en la mayoría de las fábricas nacionales.

Al derivarse la tensión admisible, F_f , asociada a la serie como cociente entre el módulo resistente característico de flexión 21,2 MPa (Tabla 7-22) y el factor de ajuste 2,1 resulta:

$$F_f = \frac{MR_{f,k}}{FA} = \frac{21,2}{2,1} = 10 [MPa] \quad (8-1)$$

Valor que excede en aproximadamente un 7% la correspondiente tensión admisible derivada de acuerdo con el procedimiento especificado en la norma NCh 2165, modificado de acuerdo con las recomendaciones de Walford relativas al cálculo de razones de resistencia, RR, para madera aserrada de pino radiata:

$$F_f = F_{f,b} \cdot RR_{f,LH} \cdot 0,85 = 19 \cdot 0,58 \cdot 0,85 = 9,4 [MPa] \quad (8-2)$$

El módulo de elasticidad promedio asociado a la serie, de acuerdo con Tabla 7-28, asciende a:

$$E = 9518 [MPa] \quad (8-3)$$

Procediendo de acuerdo con lo establecido en NCh 2165 el correspondiente valor promedio se estima como:

$$E = 0,95 \cdot T_I \cdot E_{b,A} = 0,95 \cdot 0,961 \cdot 11000 = 10040 [MPa] \quad (8-4)$$

Donde el factor de momento de inercia transformado T_I se calcula como:

$$T_I = \frac{E_{b,A} \cdot h_A^3 - (E_{b,A} - E_{b,B}) \cdot h_B^3}{E_{b,A} \cdot h_A^3} = \frac{11000 \cdot 10^3 - (11000 - 9000) \cdot 6^3}{11000 \cdot 10^3} = 0,961 \quad (8-5)$$

En este caso el módulo de elasticidad de la muestra referencial queda levemente (5%) por debajo del valor normativo.

Es posible afirmar, en consecuencia, que la muestra referencial refleja adecuadamente el producto que actualmente se produce en el mercado nacional.

En lo relativo a los antecedentes de ensayos de uniones endentadas

Por medio de la comparación de resultados de 95 probetas ensayadas a flexión y 160 a tracción se define una combinación determinada de adhesivo y fabricación, la cual corresponde al adhesivo MUF y los criterios de fabricación de las probetas relativos a las probetas ensayadas en Septiembre. (Tabla 4-2)

Así también, las conclusiones en relación a la muestra referencial: Serie 1, permitieron validar la calidad de las uniones endentadas producidas. Uniones, que por lo demás, se fabricaron mediante los mismos criterios para todas las vigas de las distintas series experimentales.

En definitiva, los antecedentes permitieron caracterizar las uniones endentadas y cimentar las bases para la fabricación de uniones de calidad estructural para la producción de elementos de madera laminada encolada.

Efectos de la incorporación integral de grados estructurales mecánicos de madera aserrada de Pino radiata en la producción de madera laminada encolada estructural

En vigas con laminación horizontal: Serie 2 versus Serie 1.

La serie 2, que consistió de 12 ensayos con vigas estándar, esto es, de dimensiones normalizadas (135mm*300mm*6,00m), fabricadas combinando láminas de Grado MGP 12 en las dos láminas exteriores en ambos bordes y láminas Grado MGP10 en el sector central. La cantidad de repeticiones indicada permite una estimación más representativa de la población caracterizada que el resto de la serie, situación que se justifica por centrarse en este producto el objetivo principal de la investigación.

- Efectos sobre el módulo resistente de flexión característico:

Comparando los correspondientes valores de las series experimentales 2 y 1 (Tabla 7-22), se aprecia:

$$\frac{MR_{f,k,12-10-12, (s2)}}{MR_{f,k,A-B-A, (s1)}} = \frac{29,9}{21,2} = 1,41 \quad (8-6)$$

- Efectos sobre el módulo de elasticidad:

Comparando los correspondientes valores de las series experimentales 2 y 1 (Tabla 7-28), se aprecia:

$$\frac{E_{prom,12-10-12, (s2)}}{E_{prom,A-B-A, (s1)}} = \frac{14049}{9518} = 1,48 \quad (8-7)$$

En vigas con laminación vertical en zona flexotraccionada: Serie 6 versus Serie 12.

La serie 6 corresponde a la versión laminación vertical en borde flexotraccionado de la serie 2 al igual que la serie 12 de la serie 1.

- Efectos sobre el módulo resistente de flexión característico:

Comparando los correspondientes valores de las series experimentales 6 y 12 (Tabla 7-22), se aprecia:

$$\frac{MR_{f,k,12-10-LV12, (s6)}}{MR_{f,k,A-B-LVA, (s12)}} = \frac{41,4}{27,0} = 1,53 \quad (8-8)$$

- Efectos sobre el módulo de elasticidad:

$$\frac{E_{prom,12-10-LV12, (s6)}}{E_{prom,A-B-LVA, (s12)}} = \frac{14373}{10090} = 1,42 \quad (8-9)$$

En definitiva, la incorporación de láminas mecánicas de los Grados MGP 10 y 12 incrementa la capacidad resistente de flexión entre un 41% a un 53% e incrementa la rigidez flexional entre un 48% a un 42%.

Lo que se puede resumir en un incremento entre un 40-50% de resistencia y 45% de rigidez, siendo mayor el aumento de resistencia para vigas con laminación vertical en zona flexotraccionada y menor para vigas con laminación horizontal.

Lo que resulta consecuencia del valor experimental que se ha controlado para el módulo de elasticidad de los productos MGP que resulta del orden de 12.250 MPa y 15.000 MPa para los grados MGP10 y MGP12, respectivamente en contraposición con 9000 MPa y 11000 MPa de los grados B y A, respectivamente. (Wagner, Caracterización Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12 de aserraderos de Arauco, 2013)).

En lo relativo a los grados visuales Grado A y Grado B

Por medio de los ensayos realizados se comprueba que las láminas Grado A y Grado B utilizadas para la producción de las probetas son de la misma calidad, y por ello, de la mismas propiedades mecánicas (Tabla 7-27). Por lo que no se cumplen los supuestos iniciales, al suponerse que el Grado A era de calidad mayor al Grado B.

Efectos de la incorporación de láminas dispuestas verticalmente en el borde flexotraccionado

En esta serie, que consistieron de 3 ensayos a flexión con vigas de dimensiones 115mm*360mm*6,00m, fabricadas combinando láminas del mayor grado en las tres láminas superiores, del menor grado en el núcleo central de seis láminas y un paquete de cuatro láminas del mayor grado dispuestas verticalmente en la zona flexotraccionada (inferior) correspondiendo al cuarto inferior.

Se fabricaron 6 series con paquetes verticales en la zona flexotraccionada pero solo 2 series con la disposición del párrafo anterior, correspondientes a la serie 12 de grados visuales (A y B) y la serie 6 de grados mecánicos MGP (12 y 10)

- Efectos sobre el módulo resistente de flexión característico:

Comparando los correspondientes valores de las series experimentales 1 y 12 y las series experimentales 6 y 2 (Tabla 7-22), se aprecia:

$$\frac{MR_{f,k,A-B-LVA, (s12)}}{MR_{f,k,A-B-A, (s1)}} = \frac{27,0}{21,2} = 1,27 \quad (8-10)$$

$$\frac{MR_{f,k,12-10-LV12, (s6)}}{MR_{f,k,12-10-12, (s2)}} = \frac{41,4}{29,9} = 1,39 \quad (8-11)$$

$$\text{Disminución porcentual de } C_v \text{ por LVZFT} = \frac{C_v(LVZF)}{C_v(LH)} = \frac{7,7\%}{18,7\%} = 0,41 \quad (8-12)$$

- Efectos sobre el módulo de elasticidad:

La incorporación de láminas de los Grados A, B, MGP12 y MGP10 con laminación vertical en el sector flexotraccionado incrementa la rigidez flexional marginalmente en relación a la disposición en laminación horizontal.

$$\frac{E_{prom,A-B-LVA, (s12)}}{E_{prom,A-B-A, (s1)}} = \frac{10090}{9518} = 1,06 \quad (8-13)$$

$$\frac{E_{prom,12-10-LV12, (s6)}}{E_{prom,12-10-12, (s2)}} = \frac{14373}{14049} = 1,02 \quad (8-14)$$

En conclusión, el efecto por laminación vertical en el borde flexotraccionado representa un incremento de la resistencia característica entre un 30-40%, siendo más cercano al 30% si las láminas utilizadas son de menor calidad (grados visuales) y más cercano al 40% para mejores calidades (grados MGP). Además, se disminuye el coeficiente de variación a un 41%, Ecuación (8-12) (Tabla 7-23) y no se altera la rigidez flexional con respecto a una disposición en laminación horizontal.

En lo relativo a vigas simétricas con laminación horizontal y con laminación vertical en el borde flexotraccionado

Dentro de las series simétricas y de laminación horizontal, no se observan similitudes en resistencia a flexión al encontrarse diferencias superiores al 28% (Tabla 7-25), sin embargo dentro del grupo de series con laminación vertical en la zona flexotraccionada sí se observa una similitud ya que los datos arrojan diferencias menores al 8% (Tabla 7-26). Lo que refleja que el efecto asimetría no es válido para vigas con laminación horizontal pero sí lo es para vigas con laminación vertical en el borde flexotraccionado y se debe mayormente a la disminución a 41%, Ecuación (8-16), de la variabilidad de los datos para la última y lo que por supuesto, va en línea con la teoría clásica de mecánica de sólidos.

En relación con los modelos de predicción europeos

Al contrastar los resultados obtenidos para la resistencia de la serie de láminas horizontales MGP12-10-12 con los resultados de los modelos de predicción europeos de las normas: EN14080(2013) y EN1194(1999), expuestos en la Sección 7.4, se obtienen diferencias de 6% y 0.2% respectivamente, Ecuación (8-15), lo que comprueba que las fórmulas utilizadas son válidas para la materia prima utilizada (Sección 2.6) y los métodos de producción nacionales (Sección 3.1).

$$\frac{MR_{k,EN1480(2013)}}{MR_{k,empírico}} = \frac{28,15}{26,57} = 1,06 \text{ y } \frac{MR_{k,EN1194(1999)}}{MR_{k,empírico}} = \frac{26,62}{26,57} = 1,002 \quad (8-15)$$

Influencia de la resistencia de los empalmes dentados de las láminas de borde flexotraccionadas

Analizando los modos de rotura en el Gráfico 7-1, se aprecia que hay diferencias importantes entre los modos de fallas de la serie 1 (de grados visuales A y B) en comparación a la serie 2 (de grados mecánicos MGP 12 y 10). Si en la serie 1 el inicio de la rotura una unión endentada se produjo en 1 de 6 casos (17%), en la serie 2 se da en 8 de 12 casos (67%).

Este comportamiento, explica que la resistencia a tracción alcanzada por las uniones endentadas, es superior a la resistencia a tracción de láminas de Grado A, pero inferior a las láminas de Grado MGP12. Por ende, si se quiere aumentar la resistencia a flexión de vigas de madera laminada encolada, es obligatorio aumentar la calidad de las láminas y la calidad de las uniones endentadas.

Un análisis visual de las resistencias individuales de las vigas en las distintas series experimentales, que se presentan el Gráfico 7-1 y Gráfico 7-2, permite apreciar que en la mayoría de las series con alta dispersión de resistencias, existe un valor marcadamente inferior al resto y que la causa de la falla corresponde a un empalme defectuoso. Dándose preferentemente en series con laminación horizontal.

Se presume así, que ante un mejor comportamiento de estas uniones, las resistencias experimentales de las series podrían compactarse en un rango de valores más estrecho, lo que redundaría en una reducción del coeficiente de variación y consecuentemente en un incremento de los módulos resistentes de flexión característicos. Hecho que se explica en párrafos anteriores.

En el Gráfico 7-2 se aprecia además, que la disposición de láminas de manera vertical en el borde flexotraccionado disminuye la influencia de uniones endentadas defectuosas al no relacionarse directamente con bajas resistencias a flexión.

Se obtiene así, una diferencia clara entre series con laminación horizontal y series con laminación vertical en el borde flexotraccionado, en cuanto a la alta dispersión de resistencias experimentales de las primeras en comparación a las segundas.

Controles visuales más detallados de un tercio de las probetas que menos resistieron por serie, permiten apreciar a su vez, que en su mayoría, fallaron por encolados defectuosos: de las 19 fallas mostradas al final de la sección 7.2.1, en 12 casos (63%) la rotura coincide con la presencia de una unión endentada en la lámina inferior y en 4 casos (21%) coincide con inclinaciones de fibra pronunciadas.

En definitiva, se debe tener especial énfasis en la fabricación de uniones endentadas en vigas de madera laminada encolada ya que la presencia de uniones defectuosas, especialmente en la lámina inferior, se relaciona directamente con bajas resistencias a flexión de todo el elemento, al desarrollarse la falla a partir de esta fisura local. Esta relación, entre uniones endentadas defectuosas y bajas resistencias, se disminuye marcadamente si se fabrican vigas con laminación vertical en el borde flexotraccionado en vez de vigas con laminación horizontal.

Efectos de la incorporación integral de grados estructurales mecánicos de madera aserrada de Pino radiata con disposición en laminación vertical en el sector flexotraccionado: Serie 06

- Efectos sobre el módulo resistente de flexión característico:

Comparando los correspondientes valores de las series experimentales 6 y 1 (Tabla 7-22), se aprecia:

$$\frac{MR_{f,k,12-10-LV12, (s6)}}{MR_{f,k,A-B-A, (s1)}} = \frac{41,4}{21,2} = 1,95 \quad (8-16)$$

- Efectos sobre el módulo de elasticidad:

Comparando los correspondientes valores de las series experimentales 6 y 1 (Tabla 7-28), se aprecia:

$$\frac{E_{prom,12-10-LV12, (s6)}}{E_{prom, A-B-A, (s1)}} = \frac{14373}{9518} = 1,51 \quad (8-17)$$

En definitiva, este trabajo de título busca definir las bases para producir vigas de MLE de alta capacidad resistente con madera de Pino radiata mediante la incorporación de tres mejoras: uniones endentadas de mayor calidad estructural, láminas clasificadas mecánicamente MGP y disposición vertical de láminas en el borde flexotraccionado.

Los resultados finales arrojaron que la incorporación de estos tres cambios se traduce en incrementos más que notables, al aumentar la resistencia característica a flexión a casi el doble (195%, Ecuación (8-16)) y el módulo de elasticidad promedio en la mitad (151%, Ecuación (8-17)).

Bibliografía

- Argüelles, R., & Arriaga, F. (2000). *Estructuras de Madera, Diseño y Cálculo, AITIM*. Madrid, España: Gráficas Palermo, S.L.
- Colling, F. (1995). Brettschichtholz unter Biegebeanspruchung (Madera laminada Encolada solicitada en flexión) STEP 3. En *Holzbauwerke nach Eurocode 5: Grundlagen Entwicklungen Ergänzungen*. Karlsruhe, Alemania.
- Dölz, M. A. (1999). *Proposición de una metodología para la derivación de tensiones admisibles de flexión para madera laminada encolada de pino radiata. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Glos, P. P. (2004). *TU-München. New Grading Methods. Proceedings of the International Symposium on Advanced Timber and <timber-Composite Elements for Buildings*. . Florence – Italy.
- González, P., Saavedra, E., Perez, E., Burgos, C., Piña, F., & Wagner, M. (2014). *Sistema Constructivo en Madera Contralaminada para Edificios. CLT Chile*. Santiago de Chile: Servicios Forestales y de Exposiciones S.A.
- INFOR. (2015). *Informe Aserraderos Arauco SA (10.9)*.
- INN. (1972). *NCh 992:1972, Madera - Defectos a considerar en la clasificación, terminología y métodos de medición*. Santiago de Chile.
- INN. (1986). *NCh 176/2:1986 Mod.1988, Madera - Parte 2: Determinación de la densidad*. Santiago de Chile.
- INN. (1989). *Nch 2148 Of.89 Madera laminada encolada estructural - Requisitos e inspección*. Santiago, Chile.

- INN. (1989). *NCh 2149 Of89, Madera - Madera aserrada - Determinación del módulo de elasticidad en flexión - Método de ensayo no destructivo*. Santiago de Chile.
- INN. (1991). *NCh 2150:1989 Mod.1991, Madera laminada encolada - Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de pino radiata*. Santiago de Chile.
- INN. (1991). *NCh 2165:1991 Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata*. Santiago de Chile.
- INN. (2005). *NCh 1207:2005, Pino radiata - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad*. Santiago de Chile.
- INN. (2006). *NCh 1198 Of. 2006 Madera - Construcciones en madera - Cálculo*.
- INN. (2013). *NCh 2148: 2013, Madera laminada encolada estructural- Requisitos, métodos de muestreo e inspección*. Santiago de Chile.
- ISO 8375. (s.f.). *Timber structures — Glued laminated timber — Test methods for determination of physical and mechanical properties*.
- Klöck, W. (2004). Determination of characteristic values for structural timber, . *Otto-Graf-Journal Vol. 15*.
- Oyarzún, P., Acevedo, J., & Fritz, A. (2011). *Madera Laminada: Arquitectura, Ingeniería y Construcción*. Santiago de Chile.
- Ramos, M. d., Sosa, M. A., Gómez, R., Torrán, E., & Piter, J. (2014). Madera Laminada Encolada Estructural de Álamo. Determinación Empírica de su Comportamiento Mecánico. *XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, (pág. 12). Montevideo, Uruguay.
- Romero, A. (2005). *La madera, el material de construcción más ecológico y menos contaminante*. AEIM.

- Sandoz, J. L. (1996). Mehrfach-Brettschichtholz ein neues Produkt (Madera laminda encolada multilaminar. Un producto nuevo.) . En E. Gehri, *Brettschichtholz. Material, Bemessung, Ausführung und Qualitätssicherung*. 28. SAH-Fortbildungskurs 1996 (pág. 11). Weinfelden, Suiza.
- Schickhofer. (2001). *Development of Efficient Glued Laminated timber*.
- Tapia, C. (2015). *Internal and external reinforcements for holes in glued lamianted beams*. Santiago de Chile.
- UNE. (2013). *EN 14080:2013, Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements*.
- Wagner, M. (2013). *Caracterización Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12 de aserraderos de Arauco*.
- Wagner, M. (2013). *Clasificación de la madera aserrada estructural de pino radiata*. Santiago de Chile.
- Wagner, M. (2013). *Normativa chilena relativa al cálculo de construcciones de madera laminada encolada*. CI 5224 Curso Diseño y Construcción en Madera Fcfm, Uchile. Santiago de Chile.
- Wagner, M. (2015). *Proyecto Arauco Turbo: Producción de madera laminada encolada de alta capacidad resistente mediante la utilización de madera aserrada de pino radiata clasificada mecánicamente*. Santiago de Chile.
- Weinig. (2016). *WEINIG EasyScan: la solución más rentable para la optimización de la madera*. Recuperado el Abril de 2016, de <http://www.weinig.com/es/madera-maciza/sistemas-de-escaner/easyscan/easyscan.html>

Apéndice A: Cálculo del valor estadístico asociado al percentil 5%

En este primer apéndice se presenta la metodología usada para el cálculo del $MR_{k,\%r}$, o módulo resistente asociado al percentil del 5% (referido a la letra k) con un nivel de confianza del 50% o 75%. Valor asociado a la resistencia a flexión característica.

Los cálculos presentes se basan en (Klöck, 2004) donde se calcula los valores K_γ para n cantidad de probetas, valores que se utilizan en la Ecuación (i). Para mayor detalle dirigirse al documento base.

$$L = \mu + K_\gamma \cdot \sigma \quad (i)$$

Donde: μ : promedio
 σ : desviación estándar
 L : intervalo de tolerancia superior
 K_γ : factor estadístico a encontrar

Las razones de este cálculo es la diferencia entre la naturaleza de la normativa europea con la normativa chilena, siendo la primera probabilística y la segunda determinística.

Lo que significa que el cálculo del percentil del 5% se realiza con un nivel de confianza del 75% en la normativa europea y de 50% en la normativa chilena se realiza.

En cuanto a la distribución de probabilidades de la resistencia de la madera, se supone que es una t-Student no centralizada. Cuya densidad de probabilidad se presenta en la ecuación (ii).

$$f(x, v, \mu) := \frac{\frac{v}{2} \cdot \exp\left[\frac{-v \cdot \mu^2}{2 \cdot (x^2 + v)}\right]}{\sqrt{\pi} \cdot \Gamma\left(\frac{v}{2}\right) \cdot 2^{\frac{(v-1)}{2}} \cdot (x^2 + v)^{\frac{v+1}{2}}} \cdot \int_0^{\infty} y^v \cdot \exp\left[\frac{-1}{2} \cdot \left(y - \frac{\mu \cdot x}{\sqrt{x^2 + v}}\right)^2\right] dy \quad (ii)$$

Integrando la densidad se obtiene la probabilidad de que tener valores menores a algún valor deseado, que en este caso corresponde a 50% o 75%. Ecuaciones (iii) y (iv). Por lo cual, lo que se debe cambiar es el valor de X, para el n deseado y con ello obtener los valores de K_γ .

$$CDF_{nct}(x, v, \mu) := \int_{-\infty}^x f(y, v, \mu) dy \quad (iii)$$

$$CDF_{nct}(X, v_j, \mu) = 0.5 \quad (iv)$$

Se calcula el K_γ para $n = 3, 6, 9, 12$ y 40 , obteniéndose la siguiente tabla:

Tabla 1: valores de $K_{\gamma,n,1-\alpha}$ para cada n y cada nivel de confianza.

	75% Confiabilidad	50% Confiabilidad
n	$k_{0.95,n,0.75}$	$k_{0.95,n,0.5}$
3	3,152	1,940
6	2,336	1,750
9	2,141	1,709
12	2,048	1,691
40	1,834	1,658

El cálculo del Módulo de Rotura asociado al percentil del 5% para cualquier n obedece la Ecuación (v) y (vi), dependiendo de la cantidad de probetas y del nivel de confianza deseado.

Para métodos de diseño determinísticos, como los incorporados en la norma nacional de cálculo de estructuras de madera, NCh 1198Of2014, el nivel de confianza corresponde al 50%, por lo que:

$$MR_k(n) = \mu_{MR} - \sigma_{MR} \cdot k_{0.95,n,0.5} \quad (v)$$

En cambio, para métodos de diseño probabilísticos, como los implícitos en la norma europea de cálculo de estructuras de madera, EN 1995-1-1, el nivel de confianza corresponde al 75%, por lo que:

$$MR_k(n) = \mu_{MR} - \sigma_{MR} \cdot k_{0.95,n,0.75} \quad (vi)$$

Finalmente es necesario, como se aprecia en la tabla 1, que el lector tome en consideración que el valor característico va disminuyendo a medida que aumenta la cantidad de probetas. Esto se debe a que para menos datos el valor característico es mayormente castigado por causa de una mayor incertidumbre.

Apéndice B: Tablas de resultados

8.1 Módulo de rotura

En este apartado se presentan los resultados de los ensayos de MR.

Tabla i: resultados ensayos, MR, series laminación horizontal simétrica.

	Nombre	Carga [kgf] Calibrada	MR [Mpa]	Tipo falla	MR característico (5%) [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 2 MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	S2-01	8463,9	● 42,5	finger	29,5	139%
	S2-02	6946,9	○ 34,9	finger-madera		
	S2-03	9903,9	● 49,8	finger		
	S2-04	6750,9	○ 33,9	finger-madera		
	S2-05	9310,9	● 46,8	madera		
	S2-06	7477,9	◐ 37,6	finger		
Serie 3 MGP 12 / B / MGP 12	S3-01	5181	○ 26,0	finger	16,4	77%
	S3-02	9675	● 48,6	finger		
	S3-03	8631	◐ 43,4	finger		
Serie 9 MGP 10 / B / MGP 10	S9-01	5344	○ 26,9	madera	21,0	99%
	S9-02	7995	● 40,2	madera		
	S9-03	7789	● 39,1	madera		
Serie 1 A / B / A	S1-01	4621	○ 23,2	madera	21,2	100%
	S1-02	6516	● 32,7	madera		
	S1-03	6789	● 34,1	madera		
	S1-04	4784	○ 24,0	madera		
	S1-05	6851	● 34,4	finger-madera		
	S1-06	6435	● 32,3	madera		
Serie 8 MGP 10 / MGP 10 / MGP 10	S8-01	8583	◐ 43,1	madera	35,2	166%
	S8-02	8186	○ 41,1	finger		
	S8-03	10096	● 50,7	madera		
Serie 14 B / B / B	S14-01	6445	◐ 32,4	madera	17,9	84%
	S14-02	4619	○ 23,2	madera		
	S14-03	7095	● 35,7	madera		

Tabla ii: resultados ensayos, serie 2B.

	Nombre	Carga [kgf] Calibrada	MR [Mpa]	Tipo falla	MR característico (5%) [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 2B MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	S2B-01	11708	● 58,84	madera	32,9	155%
	S2B-02	10828	● 54,42	madera		
	S2B-03	11881	● 59,71	finger		
	S2B-04	7990	○ 40,15	finger		
	S2B-05	7220	○ 36,29	finger		
	S2B-06	10048	● 50,50	madera		

Tabla iii: resultados ensayos, MR, series laminación horizontal asimétrica.

	Nombre	Carga [kgf] Calibrada	MR [Mpa]	Tipo falla	MR característico (5%) [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 4 MGP 10 / MGP 12	S4-01	11852	● 59,6	madera	21,5	101%
	S4-02	6569	○ 33,0	madera		
	S4-03	10034	● 50,4	madera		
Serie 5 B / MGP 12	S5-01	6612	○ 33,2	finger	28,4	134%
	S5-02	8454	● 42,5	madera		
	S5-03	8852	● 44,5	finger		
Serie 10 B / MGP 10	S10-01	8411	● 42,3	madera	34,4	162%
	S10-02	7713	● 38,8	madera		
	S10-03	7923	○ 37,2	finger		

Tabla iv: resultados ensayos, MR, serie laminación vertical en borde flexotraccionado.

	Nombre	Carga [kgf] Calibrada	MR [Mpa]	Tipo falla	MR característico (5%) [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 6 MGP 12 / MGP 10 / T MGP 12	S6-01	10923	○ 43,1	finger	41,4	195%
	S6-02	11866	● 46,8	madera		
	S6-03	11871	● 46,8	finger		
Serie 7 MGP 10 / T MGP 12	S7-01	10522	○ 41,5	finger	39,5	186%
	S7-02	11148	◐ 44,0	finger		
	S7-03	11637	● 45,9	finger		
Serie 11 B / T MGP 10	S11-01	11393	● 45,7	finger	35,4	167%
	S11-02	10512	◐ 42,2	madera		
	S11-03	9651	○ 38,7	finger		
Serie 12 A / B / T A	S12-01	9732	● 39,1	finger	27,0	127%
	S12-02	8139	○ 32,7	madera		
	S12-03	7957	○ 31,9	finger		
Serie 13 B / T A	S13-01	9034	● 36,3	finger	29,2	138%
	S13-02	7832	○ 31,4	madera		
	S13-03	9081	● 36,5	madera		
Serie 15 B / TB	S15-01	9330	● 37,5	finger	29,6	140%
	S15-02	9435	● 37,9	finger		
	S15-03	8005	○ 32,1	madera		

8.2 Módulo de elasticidad

Tabla vi: resultados ensayos, MoE, series laminación horizontal simétrica.

	Nombre	Carga [kgf] Calibrada	Tipo falla	MoE [Mpa]	MoE promedio [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 2 MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	S2-01	8463,9	finger	○ 12710,3	13707	144%
	S2-02	6946,9	finger-madera	○ 12666,4		
	S2-03	9903,9	finger	● 14342,4		
	S2-04	6750,9	finger-madera	○ 13022,9		
	S2-05	9310,9	madera	● 14455,6		
	S2-06	7477,9	finger	● 15042,5		
Serie 3 MGP 12 / B / MGP 12	S3-01	5181	finger	● 15145,8	14176	149%
	S3-02	9675	finger	● 14179,5		
	S3-03	8631	finger	○ 13203,7		
Serie 9 MGP 10 / B / MGP 10	S9-01	5344	madera	○ 10515,1	11200	118%
	S9-02	7995	madera	● 11134,5		
	S9-03	7789	madera	● 11949,4		
Serie 1 A / B / A	S1-01	4621	madera	● 9442,4	9518	100%
	S1-02	6516	madera	○ 9176,6		
	S1-03	6789	madera	● 9535,4		
	S1-04	4784	madera	○ 9343,1		
	S1-05	6851	finger-madera	○ 9358,4		
	S1-06	6435	madera	● 10254,7		
Serie 8 MGP 10 / MGP 10 / MGP 10	S8-01	8583	madera	○ 11764,6	13105	138%
	S8-02	8186	finger	● 13736,9		
	S8-03	10096	madera	● 13813,4		
Serie 14 B / B / B	S14-01	6445	madera	● 11101,5	10235	108%
	S14-02	4619	madera	○ 9853,3		
	S14-03	7095	madera	○ 9748,9		

Tabla v: resultados ensayos, MoE, serie 2B

	Nombre	Carga [kgf] Calibrada	Tipo falla	MoE [Mpa]	MoE promedio [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 2B MGP 12 / MGP 10 / MGP 12	S2B-01	11708	madera	● 14955	14391	151%
	S2B-02	10828	madera	● 14156		
	S2B-03	11881	finger	● 14554		
	S2B-04	7990	finger	○ 14255		
	S2B-05	7220	finger	● 14594		
	S2B-06	10048	madera	○ 13831		

Tabla vii: resultados ensayos, MoE, series laminación horizontal asimétrica.

	Nombre	Carga [kgf] Calibrada	Tipo falla	MoE [Mpa]	MoE promedio [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 4 MGP 10 / MGP 12	S4-01	11852	madera	● 14101,6	13775	145%
	S4-02	6569	madera	● 13863,6		
	S4-03	10034	madera	○ 13361,0		
Serie 5 B / MGP 12	S5-01	6612	finger	◐ 10966,3	11091	117%
	S5-02	8454	madera	○ 10683,9		
	S5-03	8852	finger	● 11621,4		
Serie 10 B / MGP 10	S10-01	8411	madera	● 12654,4	11353	119%
	S10-02	7713	madera	○ 10155,1		
	S10-03	7923	finger	◐ 11249,9		

Tabla viii: resultados ensayos, MoE, serie laminación vertical en borde flexotraccionado.

	Nombre	Carga [kgf] Calibrada	Tipo falla	MoE [Mpa]	MoE promedio [Mpa]	Normalizado [%]
Serie 6 MGP 12 / MGP 10 / T MGP 12	S6-01	10923	finger	● 14592,8	14373	151%
	S6-02	11866	madera	● 14745,8		
	S6-03	11871	finger	○ 13781,4		
Serie 7 MGP 10 / T MGP 12	S7-01	10522	finger	○ 12943,2	13368	140%
	S7-02	11148	finger	● 14114,6		
	S7-03	11637	finger	○ 13047,1		
Serie 11 B / T MGP 10	S11-01	11393	finger	◐ 10698,0	10642	112%
	S11-02	10512	madera	● 10862,8		
	S11-03	9651	finger	○ 10366,5		
Serie 12 A / B / T A	S12-01	9732	finger	● 11066,2	10090	106%
	S12-02	8139	madera	○ 8956,0		
	S12-03	7957	finger	◐ 10246,4		
Serie 13 B / T A	S13-01	9034	finger	● 10473,2	10197	107%
	S13-02	7832	madera	○ 9754,2		
	S13-03	9081	madera	● 10363,7		
Serie 15 B / TB	S15-01	9330	finger	◐ 9832,4	10002	105%
	S15-02	9435	finger	○ 9629,5		
	S15-03	8005	madera	● 10544,3		