

Informe Técnico N° 172



0000270

LVL

Vigas de chapas laminadas
confeccionadas con *Pinus
radiata* y *Eucalyptus nitens*



INFOR



GOBIERNO DE CHILE
CORFO

INNOVA CHILE

LVL Vigas de chapas laminadas confeccionadas con *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*

Director del Proyecto
Gonzalo Hernández C.

Módulo Propiedades Físico-Mecánicas
Marcela Guzmán F.

Módulo Clasificación Mecánica de Láminas
Andre Klemarewski

Módulo Recubrimientos Superficiales
Luis Machuca S.

Módulo Capacidad Resistente a la Flexión
Patricio Cendoya H.

Módulo Reacción al Fuego
Rodrigo Briones V.

Estudio de Prefactibilidad
RWS – Engineering OY



Concepción, Abril 2007

**LVL Vigas de chapas laminadas
confeccionadas con Pino radiata y Eucalyptus
nitens**

Registro de Propiedad Intelectual N° 162073
Concepción, Chile. 2007
I.S.B.N. 978-956-8274-90-0

Financiamiento de la presente Edición:
INNOVA CHILE a través del Proyecto "LVL:
Desarrollo tecnológico de un producto de
ingeniería en madera orientado al mercado de la
construcción, proveniente de la utilización de
trozas de bajo diámetro de Pino radiata y Eucalipto
nitens".

Primera Edición: Abril 2007
Diseño de Portada: Ricardo Oyarzún O.
Diagramación e Impresión: Impresos Valverde S.A.

El texto reproducido y las opiniones vertidas en
este documento, son de exclusiva responsabilidad
de los autores.



INFOR

PRÓLOGO

Entre los productos madereros que a nivel mundial han experimentado un fuerte crecimiento en sus indicadores de producción y demanda se encuentran los denominados productos de ingeniería en madera. Ellos corresponden a una mezcla óptima de ingeniería y recurso maderero, condición que les aporta apreciable estabilidad dimensional, alta resistencia y excelente confiabilidad estructural.

Los productos de ingeniería en maderas se encuentran en la etapa inicial de crecimiento del ciclo de vida de los productos, en un nivel inferior al que presentan los tableros OSB, la madera aserrada clasificada mecánicamente y las vigas laminadas, productos que por cierto ya se elaboran y comercializan en el país.

Dentro de la gama de productos de ingeniería en maderas sobresale el LVL (Laminated Veneer Lumber), cuya traducción al español corresponde al de viga de chapas laminadas. Este producto corresponde a un conjunto de láminas secas de madera, generalmente de 3,2 milímetros de espesor, dispuestas en la misma orientación de las fibras, adheridas y densificadas con ayuda de adhesivo, presión y temperatura. Sus principales aplicaciones se encuentran como envigados de piso o entepiso, como un solo elemento, o bien formando parte de las alas de las vigas doble T.

El proyecto "LVL: Desarrollo tecnológico de un producto de ingeniería en madera orientado al mercado de la construcción, proveniente de trozos de Pino radiata y Eucalyptus nitens", adjudicado al Instituto Forestal (INFOR) por el Fondo de Desarrollo e Innovación (FDI) de CORFO, contempla la caracterización física y mecánica de los tableros de chapas laminadas confeccionados con *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*, la homologación de tres estándares internacionales y la transferencia del desarrollo tecnológico a empresas nacionales, con énfasis en fabricas de tableros, paneles y empresas constructoras.

El presente texto corresponde a una compilación de los trabajos desarrollados, destacando los antecedentes internacionales del LVL, su caracterización física y mecánica, un estudio de prefactibilidad de una planta LVL en Chile y el comportamiento del producto frente a revestimientos y fuego.

Participaron en la realización de este estudio los profesionales de la Unidad de Desarrollo de Procesos y Productos de la Madera del Instituto Forestal y los consultores internacionales Leonard Guss Associates Inc., RWS-Engineering Oy, y Applied Composites Technologies Inc.

INDICE

CAPITULO I	ANTECEDENTES GENERALES DEL PRODUCTO	
	1. Introducción	1
	2. Definición del producto	2
	3. Proceso de fabricación	3
	4. LVL en Norteamérica	5
	5. Bibliografía	11
CAPITULO II	PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	
	1. Resumen	12
	2. Metodología	13
	3. Análisis y discusión de resultados	18
	4. Análisis estadístico	23
	5. Análisis comparativo con estudios ejecutados en otros países	27
	6. Conclusiones	31
	7. Bibliografía	32
CAPITULO III	LVL FROM MACHINE GRADED EUCALYPTUS NITENS AND RADIATA PINE VENEER	
	1. Introduction	33
	2. Machine veneer grading	34
	3. LVL lay up and pressing	37
	4. LVL bending test	38
	5. LVL bending test results	39
	6. Discussion	40
	7. Conclusions	40
	8. Recommendations	41
CAPITULO IV	COMPATIBILIDAD CON RECUBRIMIENTOS SUPERFICIALES	
	1. Resumen	53
	2. Metodología	54
	3. Análisis y discusión de resultados	56
	4. Conclusiones	60
	5. Bibliografía	60



CAPITULO V	PROPIEDADES DE REACCIÓN AL FUEGO	
	1. Resumen	61
	2. Introducción	62
	3. Metodología	65
	4. Análisis y discusión de resultados	66
	5. Conclusiones	70
	6. Bibliografía	70
CAPITULO VI	CAPACIDAD RESISTENTE A FLEXIÓN DE VIGAS COMPUESTAS	
	1. Resumen	71
	2. Descripción viga compuesta	72
	3. Ecuaciones teóricas de diseño	74
	4. Verificación estructural	77
	5. Construcción de ábacos de diseño	84
	6. Conclusiones	87
	7. Bibliografía	87
CAPITULO VII	LVL FACTORY PRE-FEASIBILITY STUDY	
	1. Summary	88
	2. Objectives & Scope	89
	3. Market information	90
	4. Raw material analysis	93
	5. Suitable technology	102
	6. Investment estimate	108
	7. Tentative profitability	108
	8. Conclusions	110

CAPÍTULO I

LVL: ANTECEDENTES GENERALES DEL PRODUCTO

Rodrigo Briones V.¹

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas opciones productivas de mayor valor agregado mediante la diversificación de productos madereros es vital para acceder a nuevos mercados. Frente a esto surgen como alternativa los Productos de Ingeniería en Madera (PIM), conocidos en Norteamérica y Europa como Engineering Wood Products (EWP), que durante las últimas dos décadas han logrado consolidar su posición en el mercado de la construcción de los países madereros desarrollados debido a su alta eficiencia y confiabilidad estructural. Entre los PIM están los paneles estructurales de madera como el Contrachapado (PLYWOOD), los tableros de hojuelas orientadas (OSB), las vigas de madera sólida laminada (GLULAM) y los productos de madera compuesta estructural, entre ellos el LVL (Laminated Veneer Lumber), Parallam (PSL), Timberstrand (LSL) y las vigas 2T (I-JOISTS).

El gran desarrollo de los PIM se basa en los siguientes aspectos: Utilizan trozas de bajo diámetro; tienen propiedades de resistencia sobresalientes, incluso mayores a la madera sólida; son posibles de producir en forma continua con dimensiones mayores al diámetro y largo de la troza utilizada, disminuyen las presiones políticas y ambientales al utilizar madera de plantaciones en vez de bosque nativo y permiten la utilización de especies de baja densidad para la elaboración de productos de ingeniería de alto grado de densificación.

¹ Ingeniero Civil en Industrias Forestales, INFOR.

2. DEFINICIÓN DEL PRODUCTO

Dentro de la gama de los PIM sobresale el LVL, cuya traducción al español corresponde al de viga de chapas laminadas. Este producto corresponde a un conjunto de chapas debobinadas secas de madera, dispuestas en orientación paralela al grano y adheridas mediante adhesivo para maderas y densificadas bajo temperatura y presión.

Las dimensiones más comunes de las vigas LVL corresponden a las siguientes:

Largos	: De 2.500 a 26.000 mm
Alturas	: De 260, 300, 400, 600, 1.200 y 1.800 mm
Espesores	: Desde 39 a 150 mm

Existen dos categorías de productos LVL:

- LVL Estructural: Elemento que se utiliza comúnmente en las construcciones residenciales y no residenciales, generalmente como vigas. El producto se utiliza en construcciones de puentes, torres de agua, casas rodantes, durmientes de vía férrea y barreras de ruido.
- LVL No Estructural: Elemento que se utiliza habitualmente en ventanas, marcos de puerta, escaleras, muebles, figuras decorativas, muebles de cocina y andamios.

El consumo de LVL estructural se concentra básicamente en Norteamérica, mientras que en Asia y Oceanía se registran los mayores consumos de LVL no estructural.

3. PROCESO DE FABRICACIÓN

El proceso de fabricación del LVL es en gran parte el mismo que se utiliza en la confección de tableros contrachapados. Las diferencias significativas se encuentran en el armado, prensado y en el tratamiento final del producto.

3.1. Preparación de trozas

Las trozas se disponen bajo riego para evitar principalmente su agrietamiento. Luego las trozas son puestas en el interior de túneles de acondicionamiento para su macerado con vapor o agua caliente.

3.2. Debobinado

Las chapas para la producción de LVL se debobinan con el mismo equipo utilizado en la producción de tableros contrachapados. La velocidad de debobinado puede alcanzar los 305 m/min. El rollete residual que se obtiene al debobinar la troza puede alcanzar un diámetro de 5 cm. En general, la tasa de procesamiento promedio en el debobinado es de 5 a 8 trozas por minuto. El espesor de la chapa es generalmente 3,2 mm. La chapa debobinada pasa a una guillotina rotatoria cuya función es cortar los defectos que aparecen en ella y dimensionarla según formatos requeridos. Para su adecuado secado, la chapa se clasifica por niveles de humedad.

3.3. Secado

Normalmente se secan las chapas en un secador de rodillo que puede incorporar sistemas automáticos de alimentación y expulsión. Para la confección del producto LVL, las chapas son secadas hasta un contenido de humedad final entre un 5 y un 8%. La temperatura de secado bordea los 180 °C. El largo de los secadores puede alcanzar sobre los 48 metros, consumiendo sobre los 20 millones de BTU de energía calórica. El tiempo de secado depende de la especie, espesor de la chapa y contenido de humedad.

3.4. Clasificación

La clasificación de las chapas es un proceso crítico en la elaboración de LVL que se realiza al finalizar el secado. En orden a cumplir con los requerimientos del producto LVL, sólo las chapas con adecuada rigidez pueden ser utilizadas. Este parámetro está relacionado con las propiedades de la chapa, tales como densidad, tamaño y número de defectos, inclinación de la fibra, contenido de humedad y temperatura de la madera. La clasificación visual sólo estima la influencia de los defectos, por lo tanto, no es un método confiable.

El método de clasificación de chapas más usado en Norteamérica es el Ultrasonic Propagation Time (UPT) que utiliza una máquina fabricada por Metriguard Company. El equipo de ensayos evalúa la resistencia y densidad de la chapa midiendo la propagación de una onda ultrasónica a lo largo de ésta.

3.5. Unión de bisel

Para alcanzar una resistencia superior del producto terminado las chapas se unen en bisel. Existen varios tipos de biselados que se confeccionan de acuerdo a la tecnología disponible.

3.6. Ensamble de chapas

Los segmentos de chapas ("chapas cortas") se recuperan y ensamblan para formar una chapa de largo y ancho adecuado al formato requerido. Una chapa ensamblada generalmente se dispone en el centro de la estructura del LVL.

3.7. Encolado

Para la confección de LVL se usa el mismo tipo de adhesivo fenólico que para la fabricación del tablero contrachapado, siendo posible también usar adhesivos ureicos. Se pueden aplicar diferentes aditivos para acortar el tiempo de prensado en caliente y mejorar el comportamiento en el prensado en frío. El adhesivo se aplica en la superficie de la chapa por extrusión o por cortina, con un gramaje entre 140 a 230 g/m².

3.8. Armado

La viga LVL se arma posicionando las chapas en la misma orientación hasta conseguir el espesor deseado.

3.9. Prensado en frío

El prensado en frío asegura la dispersión uniforme de cola entre chapas. Gracias al prensado en frío el elemento LVL resiste la manipulación posterior. La presión habitual utilizada en este proceso es de 1,2 MPa, con un tiempo entre los 3 y 5 minutos.

3.10. Prensado en caliente

La presión y temperaturas requeridas para una buena adherencia se obtienen en la prensa de platos calientes. La presión utilizada varía entre 1,4 y 1,8 MPa y depende, entre otros aspectos, de la especie de madera usada. La temperatura utilizada se encuentra entre los 140 y 160 °C. La prensa es calentada utilizando agua caliente, vapor o aceite. Al comienzo del proceso de prensado la presión es alta, disminuyendo en el tiempo de acuerdo al programa utilizado.

3.11. Corte transversal

Una vez enfriado el panel LVL, este es cortado transversalmente y ajustado a sus dimensiones finales.

3.12. Apilado

Los productos son apilados automáticamente en pilas de 1.200 mm de ancho y 900 mm de altura.

4. LVL EN NORTEAMÉRICA

En la etapa de Identificación y Desarrollo de Oportunidades de Negocio del proyecto, la empresa consultora estadounidense Leonard Guss Associates (LGA Inc.) realizó un estudio de mercado del producto LVL en Norteamérica. El documento presenta información relativa a la oferta y demanda del producto, tecnologías, capacidades instaladas, precios y proyecciones para las variables más importantes. A continuación, se resumen los principales aspectos abordados por el estudio.

4.1. Especies utilizadas

Las trozas deben tener una adecuada calidad para el debobinado. En general, el largo de las trozas es de 2,6 m y sus diámetros están entre los 20 a 33 cm. Estas longitudes permiten obtener chapas de tamaño 1,2 x 2,4 m, las cuales pueden ser usadas para la producción de tableros contrachapados o LVL.

Actualmente hay diferentes especies (coníferas y latifoleadas) que se utilizan para la confección del producto LVL. Las chapas de Douglas fir y Southern yellow pine son principalmente usadas en el oeste y sur de Estados Unidos.

La Tabla siguiente presenta las especies más utilizadas, su densidad a un 12% de humedad y el rango del módulo de elasticidad en flexión (MOE) del producto LVL.

Tabla 1. Especies típicas usadas para LVL en Norteamérica

Especies	Densidad (g/cm ³)	MOE LVL (x10 ⁶ psi)
Douglas fir	0,48	1,8 - 2,45
Southern yellow pine (loblolly)	0,51	1,8 - 2,45
Western hemlock (coast)	0,45	1,7 - 2,0
Western hemlock (interior)	0,42	1,5 - 1,8
Lodgepole pine	0,41	1,3 - 1,8
Yellow poplar	0,42	1,6 - 2,0
Aspen (Trembling)	0,39	1,6 - 1,8

El principal atributo del LVL estructural es su resistencia. La calidad visual es de segunda importancia. En general, el rango de MOE para LVL usado como viga o cabezal varía en el rango de 1,5 a 1,8 millones de psi y para las alas de vigas 2T (I-Joists) está en el rango de 1,8 a 2,45 millones de psi.

El rango habitual de espesores producidos por los fabricantes de LVL son 1" para el producto rimboard, 1 3/8" y 1 1/2" para alas de vigas I-Joists y 1 1/2", 1 3/4", 3 1/2" y 5 1/4" para cabezales y vigas. Las alturas más usadas para el producto son 9 1/2" y 11 7/8".

4.2. Industria actual

Del estudio realizado por LGA Inc. se desprende que 9 compañías norteamericanas operan más de 50 líneas de LVL en veintidós localidades de Norteamérica, con una capacidad nominal (trabajando a 2 turnos) de 93,1 MM ft³, equivalentes a 2,64 MM m³. La Figura 1 ilustra las ubicaciones de estas instalaciones.



Figura 1. Ubicación de plantas de LVL en Norteamérica

La producción de LVL en el año 2004 fue de 86,5 MM ft³ (2,44 MM m³), presentando un importante incremento respecto del año 2003. La primera mitad del año 2005 ha continuado con esta alza, la cual podría alcanzar los 96,8 MM ft³ (2,77 MM m³) al terminar el año.

La producción histórica de LVL en Norteamérica y la esperada para el año 2005 se presenta en la Figura 2.

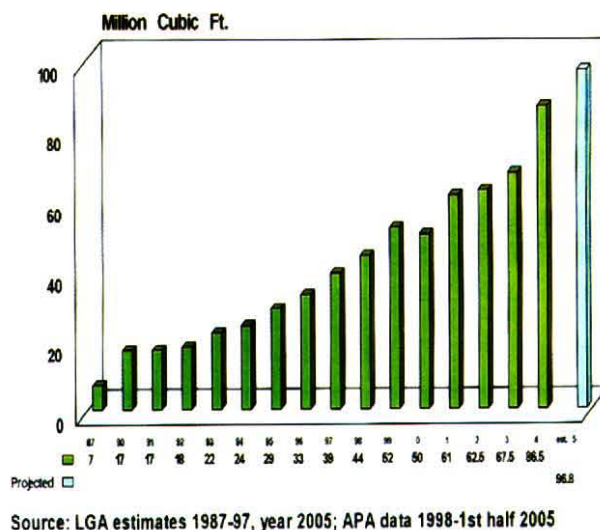


Figura 2. Producción de LVL en Norteamérica

La Tabla 2 presenta las compañías que operan plantas LVL y sus correspondientes capacidades instaladas.

Tabla 2. Plantas de LVL en Norteamérica al año 2005

Compañía	Nº Plantas	Capacidad anual (ft ³)	Capacidad anual (m ³)	% de la capacidad norteamericana
Weyerhaeuser	11*	29.667.219	840.193	31,9%
Louisiana-Pacific	3	14.625.490	414.202	15,7%
Tembec**	1	895.349	25.357	1,0%
Boise Cascade	2	26.481.325	749.967	28,4%
Georgia-Pacific	1	4.516.755	127.917	4,8%
West Fraser	1	2.749.000	77.853	3,0%
Pacific Wood Tech (CIPA)	1	3.665.333	103.804	3,9%
Internacional Paper	1	2.749.000	77.853	3,0%
Roseburg Forest Prod.	1	7.795.372	220.770	8,4%
Capacidad Total	20	93.144.844	2.637.917	100%

* 2 de las 11 plantas de la compañía están cerradas

** La compañía abrirá otra planta en Québec el año 2005

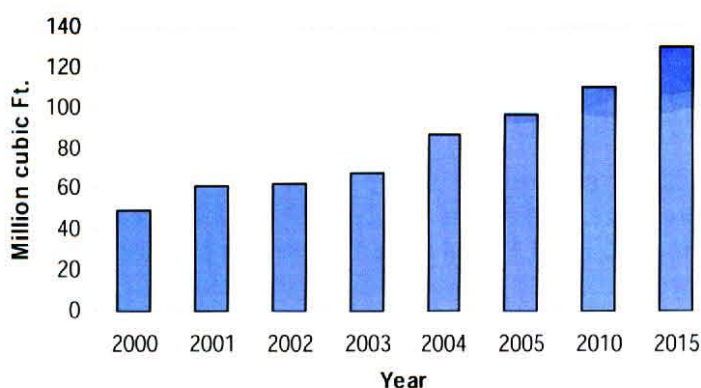
4.3. Crecimiento proyectado

Para realizar los pronósticos de demanda y consumo del LVL para el período 2005-2015, LGA Inc. consideró las siguientes variables:

- La construcción residencial en los Estados Unidos, considerando supuestos conservadores, promediará al menos 1,75 MM de unidades anuales hasta el año 2010, alcanzando las 1,8 MM de unidades en promedio al año 2015. Durante los diez años pronosticados se deberían presenciar 3 ó 4 años con promedios que excedan las 1,9 MM de unidades.
- La proyección de construcción de casas para Canadá se estima en 225.000 unidades promedio por año hasta el 2010, alcanzando las 255.000 unidades en promedio por año al 2015.
- El crecimiento del mercado potencial para el LVL se basa en aumentar la presencia del producto en los mercados existentes y promover el uso del producto en nuevas aplicaciones.
- En Norteamérica, especialmente en el sur del país, será notorio el déficit en el abastecimiento de trozas para producir madera aserrada de dimensiones mayores. Lo anterior abrirá e incrementará las oportunidades en el mercado del producto LVL y otros PIM.
- No se anticipa una disminución de la actividad económica en el período pronosticado.
- Chapas de especies latifoliadas estarían disponibles para suplir cualquier déficit posible. Se estima que el abastecimiento de chapas debería ser suficiente y adecuado, aunque a altos costos.

Basado en estos antecedentes, LGA Inc. señala que hay espacio considerable para el uso del producto LVL y otros PIM en Norteamérica. Se observa un ambiente positivo para usar más de estos productos por parte de los constructores.

La Figura 3 ilustra el pronóstico probable de consumo de LVL para el período 2010-2015. Para el año 2010 se estima un nivel de demanda de 110 MM ft³ (3,11 MM m³), cerca de 27% sobre la producción del año 2004 que alcanzó los 86,5 MM ft³ (2,44 MM m³). Para el año 2015 se estima una demanda de 130 MM ft³, equivalente a 3,68 MM m³ (50,2% sobre el nivel del año 2004).



Fuente: LGA estimates & projections

Figura 3. Producción proyectada

Producir este volumen requerirá incrementos importantes en la capacidad efectiva, especialmente en la segunda mitad del período bajo análisis. Actualmente, la industria del LVL está trabajando a plena capacidad y nuevas instalaciones serán requeridas durante el 2007 y años posteriores.

Este pronóstico probable asume que el actual nivel tecnológico, los esfuerzos de marketing por parte de las compañías para masificar la incorporación del LVL en el mercado y los costos relativos a insumos se mantienen estables (madera, adhesivo, tecnología). Sin embargo, el producto LVL es aún un material nuevo y su tecnología puede ser mejorada, lo cual podría reducir los costos de fabricación, reflejándose en una reducción de precios de venta.

Por otro lado están las posibles aplicaciones verticales del LVL (uso en techos, reemplazo de madera sólida de 2x10 pulgadas y el incremento del uso vertical de las vigas 2T para reemplazo de madera en armazones), aspecto que sugiere la necesidad de volúmenes adicionales.

LGA señala que el pronóstico potencial para el LVL es mayor que el pronóstico probable, alcanzando más de 120 MM ft³ (3,39 MM m³) al año 2010 y cerca de 145 MM ft³ (4,10 MM m³) al año 2015.

La Tabla 3 presenta el consumo de LVL en Norteamérica por tipo de aplicación.

Tabla 3. Consumo de LVL por aplicación

Aplicación	2004		2010		2015	
	MM m ³	%	MM m ³	%	MM m ³	%
Vigas I-Joists	1,050	42,3	1,246	40	1,387	38
Vigas residenciales y cabezales	1,056	43,1	1,359	44	1,699	46
Vigas no residenciales y cabezales	0,169	6,0	0,198	6	0,254	7
Armazones y laminados	0,025	1,0	0,056	2	0,084	2
Otros*	0,147	7,6	0,254	8	0,254	7
Total MM ft ³ (Pronóstico probable)	2,449	100	3,115	100	3,681	100

* Incluye tablas de andamios, puentes, armazones verticales, etc.

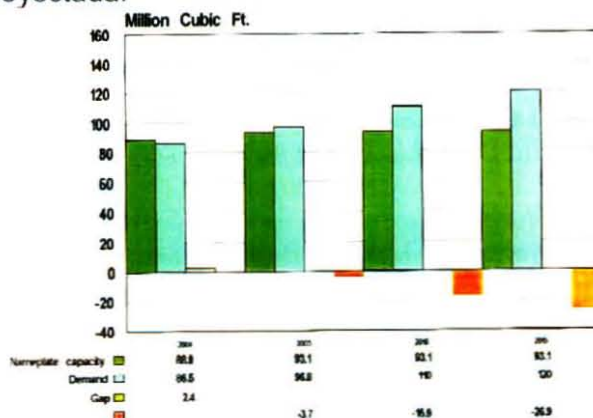
La Tabla anterior indica que las principales aplicaciones del LVL en Norteamérica son las vigas, cabezales y alas de vigas I-Joists (vigas 2T), producto de ingeniería comercializado para su uso en pisos, entresijos, columnas, techos y sistemas de paredes. Al año 2002, solamente en los Estados Unidos se comercializaron cerca de US\$ 1.000 millones en vigas I-Joists, cifra que representa el 43% del total de exportaciones chilenas de productos forestales en el mismo año (US\$ 2.301,1).

El mercado potencial para el producto LVL es amplio. Cabe destacar que sólo una pequeña fracción del consumo norteamericano total de madera aserrada de 2x10 y 2x12 pulgadas ha sido sustituido por el LVL.

4.4. Pronósticos v/s capacidad

La capacidad de producción está basada en dos turnos con 300 días de operación al año. Frente a una situación de mayor demanda del producto surge la posibilidad de incorporar nuevos turnos y trabajar más de 6 días a la semana.

Considerando que la capacidad de la industria del LVL, tal y como existe el día de hoy, está completamente utilizada, y a menos que nuevas capacidades se adicionen, teóricamente Norteamérica en el período 2006-2015 debería sufrir un déficit en la disponibilidad de LVL. La Figura 4 muestra el déficit anticipado entre la capacidad actual y la demanda futura proyectada.



Source: LGA estimates & projections

Figura 4. Capacidad de LVL v/s Demanda

Este déficit o brecha en la disponibilidad de LVL probablemente no se materialice. La brecha será cubierta por nuevas capacidades industriales norteamericanas, tales como nuevas plantas o expansión de capacidades en las instalaciones existentes, y por incremento en las importaciones. Cabe mencionar que en la actualidad hay plantas instaladas de LVL en Australia, Asia y China que abastecen el mercado estadounidense.

4.5. Costos de producción

Los costos de producción del LVL dependen de muchos factores, los cuales obviamente no son difundidos por los productores. En la Tabla siguiente se presenta una estimación de los principales costos relacionados. Los valores se asumen para una planta ubicada en el sur de Estados Unidos, con una producción anual de 3,1 MM de ft³ (0,087 MM m³), costo de trozas de 75 US\$/m³, promedio diámetro de trozas de 28 cm y rendimiento de la planta de 45%. Depreciaciones, intereses y costos de venta no son incluidas en los costos de producción.

Tabla 4. Costos de Producción del LVL

Costos	Item	US\$/ft³	%
Variables	Trozas	4,67	48,7
	Mano de obra	2,04	21,3
	Adhesivo	0,88	9,2
	Energía eléctrica	0,53	5,6
	Energía calórica	0,28	2,9
	Mantenición	0,40	4,2
	Operación	0,34	3,5
	Terminación y despacho	0,10	1,0
Fijos	Salarios	0,23	2,3
	Seguros, impuestos, otros	0,12	1,3
Costos de operación total		9,59	100

Cualquier ítem de costo puede ser sustituido de acuerdo a las condiciones locales. El costo total de operación indicado debiera ser más alto mientras continúe el alza de los combustibles.

4.6. Precios

Con los resultados del estudio, y basado en los supuestos de la economía y el mercado del LVL a futuro, se realizó una proyección de los precios.

Los precios del LVL se mantuvieron estables en la pasada década. Altos valores de MOE reflejan un alto precio del LVL. La Tabla 5 presenta el promedio histórico de precios para el LVL FOB.

Tabla 5. Precio histórico promedio del LVL, FOB fábrica

Año	US\$/ ft³
1989	16,00-17,00
1995	17,00-18,00
1999	17,50-18,50
2000	14,50-16,00
2004	@16,50-18,50
Junio, 2005	21,00-23,50

LGA Inc. pronostica que los precios del LVL FOB fábrica en Norteamérica subirán a US\$ 24,50 - 27,50 en el año 2010, continuando con un alza lenta hasta el año 2015. Si la industria del LVL hace un esfuerzo en desarrollar nuevas aplicaciones y mercados para el producto, debido a la creciente demanda por el producto y la presión en el abastecimiento de chapas, se podrían esperar precios que excedan el nivel de 25 US\$/ ft³, incluso antes del año 2010.

5. BIBLIOGRAFÍA

- LVL IN NORTH AMERICA: THE DECADE AHEAD. LVL Development, Manufacturing, current status & prospects for the future; for planning & investment. Leonard Guss Associates, Inc. 5th edition, October 2005.



CAPÍTULO II

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Marcela Guzmán F.¹
Gonzalo Hernández C.²

1. RESUMEN

Se utilizaron trozas de Pino radiata y Eucalyptus nitens para la fabricación de tableros LVL. Las trozas fueron maceradas y debobinadas obteniéndose láminas de espesor promedio 2,6 mm. Las láminas fueron secadas y clasificadas para utilizarlas en la confección de tres tipos de tableros (pino, eucalyptus y mezcla de ambas especies), conformados por 15 láminas encoladas con adhesivo fenol formaldehído.

Se fabricaron 30 tableros por cada tipo (1,22 x 2,44 metros). Desde cada uno de ellos se obtuvieron 60 probetas por ensayo (flexión cara y canto, tracción, compresión paralela, compresión perpendicular cara y canto, y cizalle en los planos LX e LY), las cuales fueron evaluadas según los procedimientos indicados por las normas ASTM D 4761 y D 5456.

Adicionalmente se llevaron a cabo ensayos de delaminación y cizalle sobre la línea adhesiva de acuerdo al procedimiento indicado por la norma ASTM D 2559.

Los resultados indican que los tableros fabricados con eucalyptus presentan un comportamiento mecánico significativamente mayor que el de las muestras pino y combi. Entre estas últimas, el comportamiento mecánico no presenta diferencias significativas.

El adhesivo fenólico utilizado en la fabricación de todas las muestras ensayadas cumple con las especificaciones mínimas de delaminación. En términos comparativos, la muestra combi alcanza el óptimo resultado, considerando que no presentó delaminación. En cizalle se alcanzan resistencias bajas, no obstante altos porcentajes de desgarro, sugiriendo repetir el ensayo.

Los valores alcanzados en todas las muestras evaluadas son comparables con los reportados por otros autores. Si se considera una clasificación mecánica de las láminas los resultados obtenidos deben mejorar.

¹ Ingeniero Civil en Industrias Forestales; MSc. Ciencia & Tecnología de la Madera. Asesor externo INFOR.

² Ingeniero Civil en Industrias Forestales. Jefe de Proyectos INFOR.

2. METODOLOGIA

2.1 Material experimental

En este estudio se utilizaron 51 trozos de pino radiata y 52 trozos de eucalyptus nitens, con un diámetro promedio de 42 cm y una longitud aproximada de 2,65 metros. Algunas características del material utilizado se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización del material utilizado

Especie	Pino radiata	Eucalyptus nitens
Edad	26 años (1979)	20 años (1985)
Ubicación del rodal	Predio Aragón. Forestal Tornagaleones Valdivia, Mariquina	Fundo Miraflores, Lanco-Valdivia
Tipo de manejo	E1 (Manejo intensivo completo).	Raleo y poda
Densidad al cosechar	400 árboles/ha.	800 árboles/ha
Tipo de suelo	Suelos derivados de rocas metamórficas, textura franca a franca arcillosa, densidad aparente media a alta, profundidad moderada, drenaje moderado lento.	Trumao profundo sobre roca metamórfica
Índice de sitio	30	--
Otra información		Anillado con corte doble a 1" distancia y profundidad 1" (corte del cambium) + anillo descortezado ancho "una cuarta". Volteo abril 2005

Los trozos fueron macerados por 24 horas en cámaras de vapor independientes, con una temperatura inicial de 25°C, por un lapso de 6 horas; que luego se incrementó a 50°C por 6 horas más, para finalizar las 12 horas restantes con una temperatura de 80°C.

El material fue descortezado, despuntado y debobinado para obtener láminas con un espesor objetivo de 2,6 mm, las que luego fueron guillotizadas privilegiando la obtención de láminas full³, independiente de los defectos presentes en ellas.

La temperatura del rollete residual fue medida con una pistola infrarroja en todos y cada uno de los trozos procesados, obteniéndose valores entre 35 y 45°C. La humedad de las láminas fue registrada con un xilohigrómetro digital, arrojando valores por sobre el PSF (punto de saturación de las fibras).

Las láminas fueron secadas a una humedad objetivo de 6 a 8% bajo condiciones de velocidad del aire de 4 a 5 m/segundos y una temperatura de 125 °C. A la salida del secador las láminas fueron clasificadas de acuerdo a las dimensiones, frecuencia e intensidad de sus defectos (ver Tabla 2):

³ Corresponde a una lámina utilizable en forma completa en un tablero, cuyo formato seco es de 1,22 x 2,44 m.

Tabla 2: Clasificación de láminas post-secado

Calidad	Nudos sólidos		Nudos muertos		Rajaduras/grietas	
	Cantidad	mm	Cantidad	mm	Ancho, mm	Largo, mm
A	-	-	-	-	2	50
B	Sin límite	25	-	-	2	50
C	Sin límite	38	Sin límite	25	10	90
D	Sin límite	65	Sin límite	65	25	90
I	Sin límite	Sin límite	Sin límite	90	25	90

La clasificación obtenida para las láminas de pino radiata alcanzó calidades C (caras), D (trascara), I (interiores); mientras que para eucalyptus nitens solamente fueron obtenidas láminas de calidad I. Dado lo anterior, las láminas de esta última especie fueron reclasificadas y reagrupadas generando un nuevo grupo, denominado "calidad I*". La cantidad y distribución de las láminas obtenidas se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3: Clasificación de láminas por especie

Especie	Calidad A	Calidad B	Calidad C	Calidad D	Calidad I*	Calidad I
Pino radiata	0	0	281	342	0	174
E. nitens	0	0	0	0	228	495

Se programó la fabricación de tableros de 15 láminas, equivalentes a 40 mm de espesor, que luego de la contracción por efecto del prensado alcanzaría el espesor objetivo 38 mm.

Basándose en la cantidad y calidad de las láminas obtenidas se fabricaron 90 tableros (tres tipos: pino, euca, combi y 30 unidades de cada uno) utilizando adhesivo fenolformaldehído (OXIMIX 2180). La cantidad y distribución de láminas que se utilizó en cada uno de ellos se presenta en la Figura 1.

PINO	EUCA	COMBI
C	I+	C PINO
C	I+	C PINO
D	I	D PINO
D	I	D PINO
D	I	D PINO
I	I	I* NITENS
I	I	I NITENS
I	I	I NITENS
I	I	I NITENS
I	I	I NITENS
I	I	I NITENS
I	I	I NITENS
D	I	I* NITENS
D	I	D PINO
D	I	D PINO
C	I+	C PINO
C	I+	C PINO

Figura 1: Esquema de fabricación de tableros, según calidad de láminas

Las condiciones iniciales de fabricación de los tableros corresponden a un gramaje promedio de 200 g/m², temperaturas de prensado de 135 °C, presión específica de 12

kg/cm² y una razón de prensado de 0,8 minutos/mm, arrojando un tiempo total de prensado de 30 minutos. Este proceso consideró un tiempo de reposo y pre-prensa de 5 minutos por etapa, con una presión manométrica del orden de 100 kg/cm².

En los tableros de eucalyptus se presentaron inconvenientes con la calidad del producto debido al soplado de los tableros, por lo que las condiciones de fabricación fueron modificadas intentando bajar la presión de vapor presente, principal causa de este defecto, a través de la disminución de la temperatura (130°C), la cantidad de adhesivo (180 g/m²) y el aumento del tiempo de prensado (35 minutos). Las Figuras 2 y 3 muestran el desgarro de la madera en tableros de pino (izquierda) y eucalyptus (derecha) fabricados bajo las mismas condiciones de operación, observando el anclaje deficiente en estos últimos.



Figuras 2 y 3: Desgarro de madera por cada línea de cola, tableros pino y eucalyptus

Los tableros fueron formateados a dimensiones de 1,22 x 2,44 metros, y luego cortados según la necesidad de probetas para la ejecución de las diferentes pruebas físico-mecánicas.

2.2. Evaluaciones físico-mecánicas

Los ensayos físico-mecánicos se realizaron de acuerdo a los procedimientos indicados por las normas ASTM D 5456 "Standard specification for evaluation of structural composite lumber" y ASTM D 4761 "Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material". Dichas normas establecen, entre otros detalles, las dimensiones de cada probeta, el procedimiento a utilizar y la información que debe ser registrada.

Considerando que las normas antes mencionadas establecen rangos para las relaciones de espesor (e), ancho (a), largo (L), luz (l) y/o sección transversal mínima (st) se determinó usar algunas relaciones utilizadas por otros autores a fin de comparar los resultados. La siguiente tabla muestra las relaciones que indica la norma para las dimensiones de cada probeta y las seleccionadas para la confección de éstas.

Tabla 4: Dimensiones de cada probeta según Normas ASTM D 5456/4761

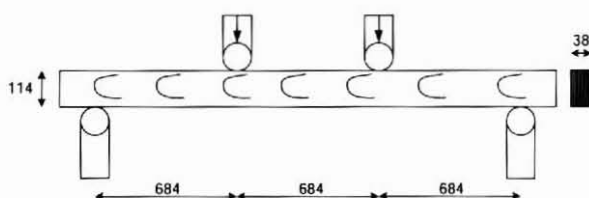
Ensayo	Relaciones en norma ASTM D 5456/4761	Dimensiones seleccionadas
Flexión estática Canto	$h = (1-12)e$ $a = e$ $L = l + \text{delta}; l = 18h$	$h = 3e$ $a = e$ $L = l + \text{delta}, l = 18h$
Flexión estática Cara	$h = e$ $a = (1-5)e$ $L = l + \text{delta}; l = 32e$	$h = e$ $a = 2e$ $L = l + \text{delta}, l = 32e$
Tracción	$h = e$ $a = (1-5)h$ $L = l + \text{delta}; l = 25h$	$h = e$ $a = 2h$ $L = l + \text{delta}, l = 25h$
Compresión paralela	$st_{\text{mínima}} = 38 \times 38$ $L > 2,5$ veces la dimensión mayor	$st = 38 \times 38$ $L = 180$
Comp. perpendicular canto	$st_{\text{ideal}}: 50 \times 50$, $st_{\text{mínima}} = 38 \times 38$; $L: 150$	$st = 38 \times 38$ $L = 150$
Comp. perpendicular cara	$st_{\text{ideal}}: 50 \times 50$, $st_{\text{mínima}}: 38 \times 38$ $L: 150$	$st = 38 \times 38$ $L = 150$
Cizalle paralelo al plano LY Cizalle paralelo al plano LX	$51 \times 50 \times 64$, con área de falla (AF) mínima de $25,81 \text{ cm}^2$	$38 \times 50 \times 81$; AF = $25,84 \text{ cm}^2$ $50 \times 38 \times 65$; AF = $26,00 \text{ cm}^2$

Con esta información se diagramó la obtención de 16 probetas por cada tablero (8 ensayos, 2 repeticiones por ensayo): flexión cara, flexión canto, tracción paralela, compresión paralela, compresión perpendicular cara, compresión perpendicular canto, cizalle LX y cizalle LY.

Todas las probetas fueron acondicionadas a una temperatura de $20 \pm 6 \text{ }^\circ\text{C}$ y $65 \pm 5\%$ de humedad relativa, alcanzando un 12% de humedad equilibrio antes de ser ensayadas.

En el caso del ensayo de flexión, tanto para la condición de cara como para la condición de canto, la probeta es cargada transversalmente por dos fuerzas espaciadas y equidistantes desde los soportes, tal y como se muestra en la Figura 4.

A) Ensayo de flexión en el canto



B) Ensayo de flexión en la cara

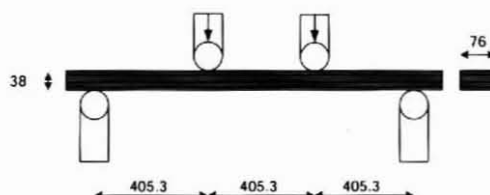
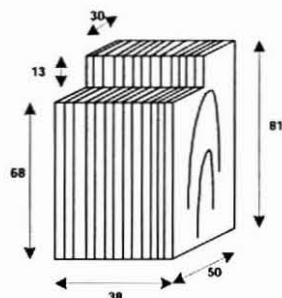


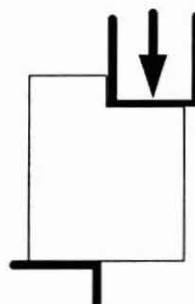
Figura 4: Configuración ensayo de flexión para un espesor de 38 mm (medidas en mm)

En el caso del ensayo de cizalle se identifican las direcciones ortogonales del tablero a fin de obtener las probetas para el ensayo en los planos LX e LY (ver Figura 5).

A) Cizalle en el plano L-Y



C) Esquema de carga



B) Cizalle en el plano L-X

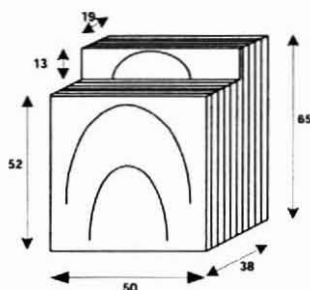
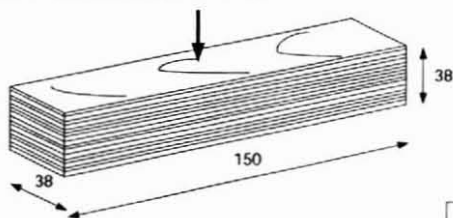


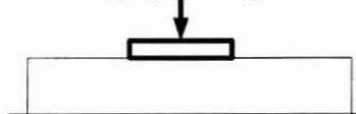
Figura 5: Probeta para el ensayo de cizalle paralelo al grano (medidas en mm)

Para el ensayo de compresión perpendicular, la carga fue aplicada a través de una lámina de superficie determinada (50x50 mm) la cual es apoyada por la cara o el canto de la probeta, tal y como se muestra en la Figura 6.

A) Compresión perpendicular en el plano Y-L



C) Esquema de carga



B) Compresión perpendicular en el plano X-L

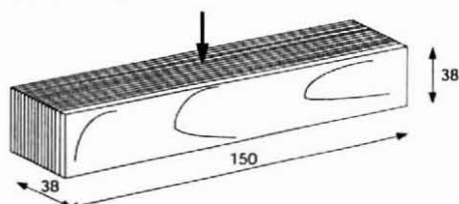


Figura 6: Probeta para el ensayo de compresión perpendicular (medidas en mm)

A cada probeta ensayada se le determinó la densidad básica (S_{og}) y el contenido de humedad al momento del ensayo.

Adicionalmente se llevó a cabo la evaluación del adhesivo utilizado en la fabricación de los compuestos. Dichos ensayos se realizaron de acuerdo a lo indicado por la norma ASTM D 2559 "Adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (wet use) exposure conditions", la cual establece dos tipos de ensayos: cizalle y delaminación. Dichas pruebas se realizaron a un universo de 18 probetas por ensayo y por cada tipo de tablero, las que fueron obtenidas desde 6 tableros seleccionados al azar (tres repeticiones por cada tablero).

3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Propiedades físico-mecánicas de los tableros fabricados en Chile

Desde cada tipo de tablero fueron obtenidas dos probetas para la realización de cada ensayo mecánico; lo que significa un universo total de 60 probetas por cada propiedad. Con estos datos se realizó un análisis de varianza (Test de Tukey al 95% de confianza) que permitió establecer el comportamiento mecánico de cada tipo de tablero, y además determinar si entre ellos hay diferencias estadísticas.

La Tabla 5 presenta los resultados promedio de los parámetros de módulo de ruptura (MOR), resistencia máxima (T_{max}), módulo de elasticidad (MOE), contenido de humedad al momento del ensayo (CH) y densidad básica (S_{og}) de cada lote de probetas ensayadas.

En términos generales se observa que para la mayor parte de las propiedades evaluadas, el tablero fabricado con eucalyptus alcanza un comportamiento mecánico significativamente superior al de aquellos fabricados con pino y/o mezcla de ambas especies (combi).

La densidad y contenido de humedad son factores de vital importancia cuando se pretende analizar el comportamiento mecánico de algún producto. En este caso los resultados concuerdan con lo esperado; ya que los tableros fabricados con eucalyptus presentan la mayor densidad (578 kg/m^3), alcanzando una mayor resistencia frente a determinados esfuerzos. De la misma manera, los tableros de pino alcanzan el menor valor de densidad (458 kg/m^3), en consecuencia el más bajo comportamiento entre los productos evaluados.

Todas las probetas fueron acondicionadas a un 12% de humedad antes de ser ensayadas. Los valores mostrados indican que todas ellas están dentro de un rango que no afectaría de manera significativa el comportamiento alcanzado (10 a 12%).

Tabla 5: Evaluación promedio de las propiedades físico-mecánicas, n=60

Ensayo	Parámetro	Unidad	Tipo producto		
			Pino	Combinado	Eucalyptus
Flexión cara	MOR	N/mm ²	57,96	63,05	81,48
	MOE	N/mm ²	<u>9.179</u>	<u>9.555</u>	10.996
	CH	%	10,20	11,48	10,86
	Sog	kg/m ³	456	502	575
Flexión canto	MOR	N/mm ²	51,75	58,86	65,17
	MOE	N/mm ²	10.070	10.520	11.975
	CH	%	<u>10,39</u>	11,02	<u>10,45</u>
	Sog	kg/m ³	458	503	582
Tracción	T _{max}	N/mm ²	27,63	32,30	42,88
	CH	%	<u>10,18</u>	11,15	<u>10,45</u>
	Sog	kg/m ³	450	500	539
Compresión Paralela	T _{max}	N/mm ²	32,45	33,46	34,84
	CH	%	9,82	11,12	10,58
	Sog	kg/m ³	458	506	565
Compresión Perpendicular (condición canto)	T _{max}	N/mm ²	<u>19,09</u>	20,08	<u>18,55</u>
	CH	%	<u>9,56</u>	10,94	<u>9,71</u>
	Sog	kg/m ³	456	510	588
Compresión Perpendicular (condición cara)	T _{max}	N/mm ²	<u>17,29</u>	<u>17,28</u>	20,85
	CH	%	<u>9,49</u>	<u>11,71</u>	<u>9,62</u>
	Sog	kg/m ³	465	504	591
Cizalle (plano L-X)	T _{max}	N/mm ²	7,56	<u>8,68</u>	<u>9,02</u>
	Falla madera	%	92	<u>94</u>	<u>97</u>
	CH	%	9,10	<u>10,11</u>	<u>9,86</u>
	Sog	kg/m ³	467	<u>523</u>	<u>588</u>
Cizalle (plano L-Y)	T _{max}	N/mm ²	<u>5,09</u>	<u>5,03</u>	3,63
	CH	%	9,18	10,48	9,91
	Sog	kg/m ³	453	503	577

___: No existe diferencia estadística entre las muestras

Los siguientes gráficos muestran en forma comparativa el comportamiento mecánico de las muestras ensayadas frente a los diferentes esfuerzos. En las Figuras 7 y 8 se observa para las condiciones de cara y canto que los valores de módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) son significativamente mayores en aquellos tableros fabricados con eucalyptus.

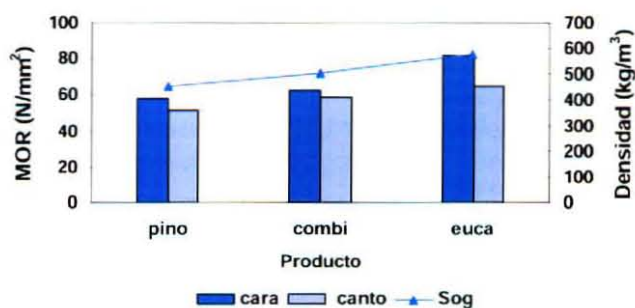


Figura 7: Resultados comparativos para LVL, ensayo de flexión cara y canto

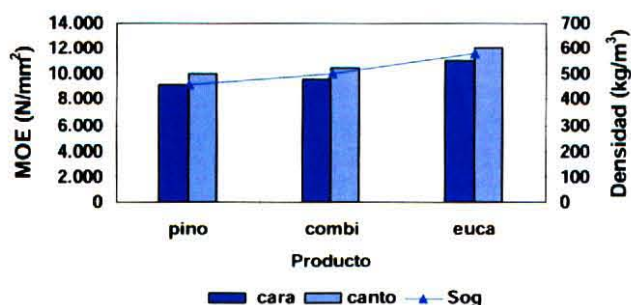


Figura 8: Resultados comparativos para LVL, ensayo de flexión cara y canto

En la Figura 9 se muestran los resultados alcanzados para los ensayos de tracción y compresión paralela. Se observa claramente un mejor comportamiento de los tableros de eucalyptus respecto de los otros tableros evaluados.

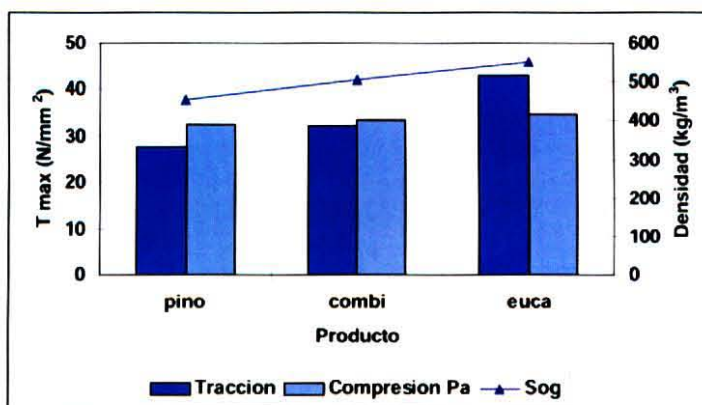


Figura 9: Resultados comparativos para LVL, ensayo de tracción y compresión paralela

En compresión perpendicular condición de canto, la mayor resistencia se alcanza para la muestra combi; a pesar que su densidad no es la mayor. Si bien esto difiere con lo discutido se destaca que la fuerza en este ensayo se aplica en forma paralela a las láminas. Para la condición de cara, la tendencia se mantiene similar al resto de los ensayos, donde el mejor comportamiento se observa para los tableros de eucalyptus, mientras que el comportamiento más deficiente es alcanzado por aquellos fabricados con pino (Figura 10).

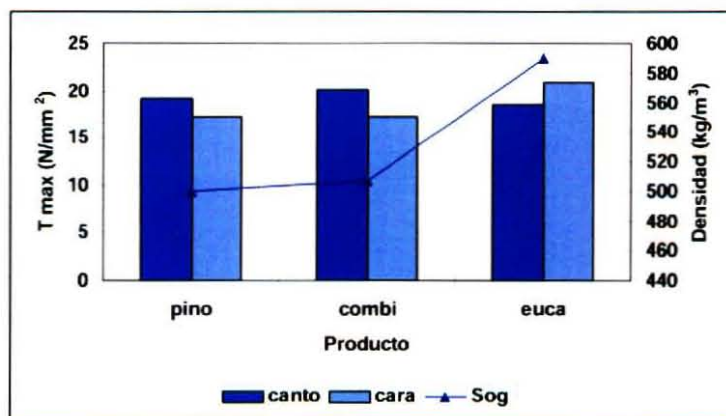


Figura 10: Resultados comparativos para LVL, ensayo de compresión perpendicular

En el ensayo de cizalle en el plano LX (Figura 11) la tendencia es similar, es decir, los tableros de eucalyptus arrojan un mejor comportamiento; mientras que para cizalle en el plano LY, la muestra pino alcanza un comportamiento mecánico significativamente mayor al de la muestra eucalyptus, sin embargo, no existen diferencias significativas con la muestra combi.

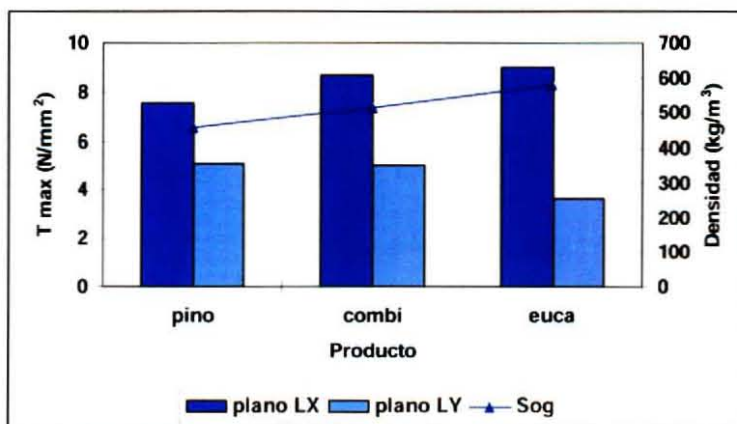


Figura 11: Resultados comparativos para LVL, ensayo de cizalle

3.2. Evaluación físico-mecánica sobre la línea adhesiva

Los resultados del ensayo de cizalle indican que los tableros combi alcanzan el mayor valor de resistencia, sin embargo, esta muestra no presenta diferencias estadísticas significativas con la muestra eucalyptus (Test de Tukey al 95% de confianza). En términos del desgarro, todas las muestras alcanzan valores bastante altos; sin observarse diferencias significativas entre éstas (ver Tabla 6).

Tabla 6: Evaluación físico-mecánica sobre la línea adhesiva

Ensayo	Parámetro	Unidad	Tipo producto		
			Pino	Combinado	Eucalyptus
Cizalle unión adhesiva	Resistencia	N/mm ²	4,12	8,09	7,43
	Falla madera	(%)	87	94	97
	CH	%	9,54	10,52	10,07
	Sog	kg/m ³	466	522	596
	n	--	18	18	18

—: No existe diferencia estadística significativa entre las muestras

De acuerdo a lo indicado por norma (ASTM D 2559), la resistencia promedio alcanzada debe ser igual o mayor a la resistencia de la madera sólida de la especie utilizada para la fabricación del compuesto al mismo contenido de humedad, y además presentar un desgarro igual o mayor al 75%. También recomienda que si no es satisfecha la condición de resistencia, pero el requerimiento de desgarro es mayor al 95%, se debe repetir el ensayo.

La norma ASTM D 2559 entrega un listado de los valores de cizalle de las especies comerciales más importantes, sin embargo, todas éstas corresponden a especies crecidas en E.E.U.U. por lo que no pueden ser utilizadas como medio de comparación.

Para realizar la comparación se utilizaron valores de cizalle paralelo para el pino radiata y eucalyptus nitens que han sido publicados en el país por el Instituto Forestal (INFOR, 1991 y 2004): 7,6 N/mm² para pino radiata y entre 10,9 a 14,2 N/mm² para eucalyptus nitens. De acuerdo a lo anterior, se observa que los valores alcanzados para todos los productos evaluados son bastante más bajos que los reportados para las especies utilizadas.

Es importante mencionar que los tableros fabricados no cuentan con una clasificación previa de las láminas utilizadas, por lo que los valores de resistencia alcanzados representan la condición más desfavorable. Sin duda al utilizar una clasificación mecánica previa de las láminas los valores serían sustancialmente mayores y más cercanos a los reportados para la madera sólida.

Respecto al desgarro, se observa en todas las muestras evaluadas que el valor es bastante alto, superando con creces el valor mínimo que indica la norma. A pesar de lo anterior sólo las muestras combi y eucalyptus alcanzan la condición de repetir el ensayo.

Respecto a la delaminación los resultados indican que de las dieciocho probetas evaluadas, sólo dos en la muestra pino y seis de la muestra eucalyptus presentaron delaminaciones (Tabla 7).

Tabla 7: Ensayo de delaminación

Producto	Probetas delaminadas	Delaminación por probeta (%)	Delaminación promedio del lote (%)
Pino	2	1,0 0,9	0,10
Combi	0	0	0,00
Eucalyptus	6	0,9 0,3 0,3 0,6 0,2 0,4	0,15

Se observa para todas las muestras evaluadas que la delaminación promedio es bastante menor a la exigida por la norma (5% para coníferas y 8% para latifoleadas). Mas aún, la norma además establece que las delaminaciones de alguna línea de cola no deben sobrepasar el 20% del valor general, esto es 1% para coníferas y 1,6% para latifoleadas. Dichos valores son también superados por las muestras, pues la mayor delaminación se observa en una probeta de pino con un 1% de delaminación.

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Las normas utilizadas en la evaluación físico-mecánica de los productos (ASTM D 4761 y ASTM D 5456) indican que para el análisis estadístico de los resultados inicialmente se debe homogeneizar el contenido de humedad de las probetas. Luego se debe obtener el valor característico para la distribución de resultados de la propiedad evaluada, y finalmente establecer la tensión de diseño asociada a cada propiedad (Tabla 8).

4.1. Corrección por contenido de humedad

Para la homogeneización del contenido de humedad de todas las probetas evaluadas se debe utilizar la siguiente expresión:

$$P_2 = P_1 * \frac{\alpha - \beta * H_2}{\alpha - \beta * H_1}$$

Donde:

H_1, H_2 = Contenido de humedad en base seca, en %.

P_1, P_2 = Propiedad medida a la humedad H_1 y H_2 , respectivamente.

α, β = Constantes obtenidas de la tabla que se adjunta a continuación.

Tabla 8: Valores característicos para cada propiedad evaluada

Propiedad	α	β
Módulo de elasticidad	1,44	0,0200
Resistencia a la flexión	1,75	0,0333
Resistencia a la tracción paralela	1,75	0,0333
Resistencia a la compresión paralela	2,75	0,0833
Resistencia al cizalle paralelo	1,33	0,0167
Resistencia a la compresión perpendicular	1,00	0,0000

En este caso se determinó una humedad objetivo del 12%. Todos los esfuerzos determinados fueron corregidos y ajustados a este valor.

4.2. Valor estadístico característico

Para la resistencia a la flexión (MOR), tracción paralela, compresión paralela y cizalle paralelo, el valor estadístico característico corresponde al quinto percentil de la tolerancia límite (límite inferior con exclusión del 5%), con un nivel de confianza del 75%.

Para el módulo de elasticidad (MOE) en flexión y para la resistencia a la compresión perpendicular, el valor estadístico característico corresponde al valor promedio entregado por la curva con un 95% de nivel de confianza.

El procedimiento consiste en determinar el parámetro respuesta asociado a cada propiedad (T_{max} para todos los ensayos a excepción de flexión donde se calcula MOR y MOE). Con estos datos se debe confeccionar un histograma y elegir una distribución de frecuencias adecuada (normal o lognormal) para determinar el valor promedio, desviación estándar, coeficiente de variación y el parámetro de tolerancia límite (PTL), que corresponde al 5° percentil con un 75% del nivel de confianza.

La Figura 12 muestra un ejemplo del histograma obtenido para el MOR en flexión, donde se observa la distribución de los 60 datos obtenidos.

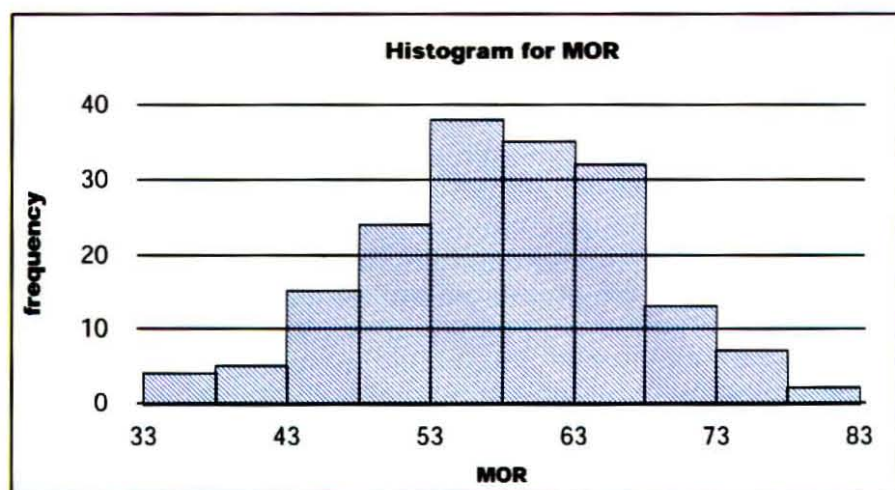


Figura 12: Histograma de frecuencia, ensayo flexión canto, muestra combi

Para el caso particular de este ensayo, los valores se encuentran distribuidos entre 46,33 y 71,80 N/mm². El histograma se construye entonces a partir de la frecuencia de los valores encontrados en este rango de valores, y luego se divide en 100 porciones (99 zonas). El valor correspondiente a cada división será el percentil indicado y el valor mínimo corresponderá al percentil 1%, mientras que el percentil 99% corresponde al valor máximo encontrado. De la misma manera se extrae el valor correspondiente al quinto percentil, que en este caso corresponde a 49,19 N/mm² en este caso.

La Tabla 9 muestra el valor característico alcanzado por cada tipo de tablero y para cada propiedad evaluada a un contenido de humedad del 12%.

En esta tabla se observan tendencias similares a las informadas en el punto 3.1 donde el análisis se realizó respecto a los valores promedio de cada tipo de tablero y con humedades entre 10 y 12%. Esto es, los tableros de eucalyptus alcanzan un mejor comportamiento mecánico, mientras que aquellos fabricados con pino radiata alcanzan los menores valores.

Tabla 9: Valores característicos alcanzados por cada tipo de tablero, CH: 12%

Ensayo	Parámetro	Unidad	Tipo producto		
			Pino	Combinado	Eucalyptus
Flexión cara	MOR	N/mm ²	37,92	49,63	66,95
	MOE	N/mm ²	8.909	9.474	10.790
	Sog	kg/m ³	456	502	575
Flexión canto	MOR	N/mm ²	36,67	49,16	44,88
	MOE	N/mm ²	9.810	10.351	11.671
	Sog	kg/m ³	458	503	582
Tracción	T _{max}	N/mm ²	22,25	25,07	33,64
	Sog	kg/m ³	450	500	539
Compresión paralela	T _{max}	N/mm ²	25,91	29,83	31,05
	Sog	kg/m ³	458	506	565
Comp. perpendicular (condición canto)	T _{max}	N/mm ²	19,09	20,08	18,55
	Sog	kg/m ³	456	510	588
Comp. perpendicular (condición cara)	T _{max}	N/mm ²	17,29	17,28	20,85
	Sog	kg/m ³	465	504	591
Cizalle (plano L-X)	T _{max}	N/mm ²	4,58	4,76	5,00
	Falla madera	%	92	94	97
	Sog	kg/m ³	467	523	588
Cizalle (plano L-Y)	T _{max}	N/mm ²	3,65	3,76	2,57
	Sog	kg/m ³	453	503	577

MOR: módulo de ruptura, MOE: módulo de elasticidad, T_{max}: resistencia máxima, CH: contenido de humedad, Sog: densidad básica

4.3. Definición de las tensiones de diseño

Las tensiones de diseño para cada una de las propiedades mecánicas evaluadas son calculadas considerando el valor característico de la propiedad y el factor de ajuste correspondiente (Tabla 10), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S = \frac{B}{C_a}$$

Donde :

S = tensión de diseño.

B = valor característico.

C_a = factor de ajuste, ver tabla siguiente.

Tabla 10: Factor de ajuste según propiedad a evaluar

Propiedad	Factor de ajuste
Módulo de elasticidad aparente	1,00
Resistencia a la flexión	2,10
Resistencia a la tracción paralela	2,10
Resistencia a la compresión paralela	1,90
Resistencia al cizalle paralelo	3,15
Resistencia a la compresión perpendicular	1,67

Este factor incluye el efecto de la duración de la carga, el cual considera 10 años como duración normal, manteniendo además un rango de seguridad. Los valores obtenidos corresponden a la propiedad de diseño admisible, siempre que el elemento de madera de chapas laminadas mantenga las mismas condiciones en las que fue ensayado.

La Tabla 11 muestra las tensiones de diseño obtenidas para cada uno de los tres tipos de productos evaluados y por cada propiedad testada.

Tabla 11: Tensiones de diseño calculados por cada tipo de tablero

Ensayo	Parámetro	Unidad	Tipo producto		
			Pino	Combi	Euca
Flexión cara	MOR	N/mm ²	18,06	23,63	31,88
	MOE	N/mm ²	8.909	9.474	10.790
Flexión canto	MOR	N/mm ²	17,46	23,41	21,37
	MOE	N/mm ²	9.810	10.351	11.671
Tracción	T _{max}	N/mm ²	10,60	11,94	16,02
Compresión paralela	T _{max}	N/mm ²	13,64	15,70	16,34
Comp. perpendicular canto	T _{max}	N/mm ²	11,43	12,02	11,11
Comp. perpendicular cara	T _{max}	N/mm ²	10,35	10,35	12,49
Cizalle L-X	T _{max}	N/mm ²	1,45	1,51	1,59
Cizalle L-Y	T _{max}	N/mm ²	1,16	1,19	0,82

Cuando alguna de las características es modificada, la propiedad de diseño admisible también es alterada, siendo algunas más influyentes que otras.

5. ANÁLISIS COMPARATIVO CON ESTUDIOS EJECUTADOS EN OTROS PAÍSES

5.1. Nueva Zelanda – Eucalyptus nitens

Una publicación del New Zeland Forest Research Institute (Reprint N° 2824) señala algunas propiedades mecánicas de los tableros LVL fabricados con eucalyptus nitens. El estudio indica que las láminas utilizadas en la fabricación de los tableros fueron previamente clasificadas según su rigidez determinada a través de un test acústico. Con este material se fabricaron tres tipos de tableros: baja, media y alta rigidez. Los resultados mostrados en la Tabla 12 corresponden al valor promedio de las propiedades mecánicas informadas para el eucalyptus nitens crecido en Chile y Nueva Zelanda.

Tabla 12: Resultados comparativos para LVL fabricados con eucalyptus nitens

Ensayo	Parámetro	Unidad	Nueva Zelanda				Chile
			Todos	Baja	Media	Alta	
Flexión cara	MOR	N/mm ²	82,2	69,2	84,4	96,3	81,5
	MOE	N/mm ²	14.300	11.900	14.700	16.600	10.996
	n	--	85	35	35	30	60
Tracción	T _{max}	N/mm ²	58,2	44,9	58,8	73,5	42,9
	n	--	85	35	35	30	60
Compresión Paralela	T _{max}	N/mm ²	52,4	48,8	52,4	56,8	34,9
	n	--	85	35	35	30	60

MOR: módulo de ruptura, MOE: módulo de elasticidad, T_{max}: resistencia máxima

La Figura 13 muestra los valores alcanzados para todos los tableros evaluados, tanto en Nueva Zelanda como en Chile, observando que el módulo de ruptura (MOR) de los tableros fabricados en Chile es bastante cercano al reportado para todos los tableros de Nueva Zelanda y superior al reportado para aquellos de baja rigidez. Se observa, además, que el módulo de elasticidad (MOE) de los tableros fabricados en Chile es levemente inferior al reportado para los tableros de baja rigidez.

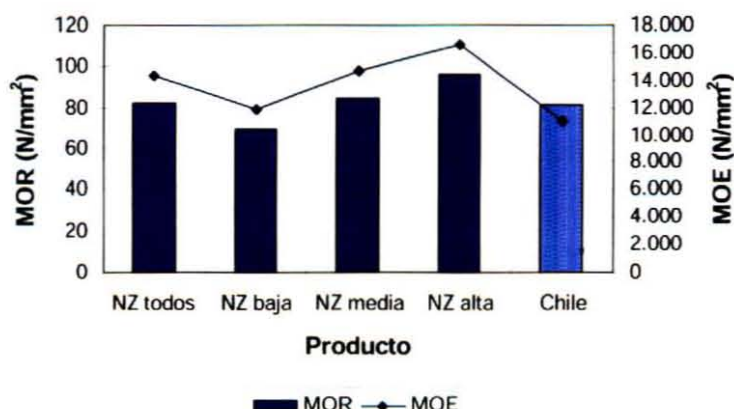


Figura 13: Resultados comparativos ensayo de flexión

El estudio de la referencia indica que las probetas mantienen una humedad promedio entre 8 y 10%, en circunstancias que la humedad promedio de los tableros fabricados y evaluados en Chile está entre 10 y 12%; por lo que estos valores podrían eventualmente ser aún un poco mayores si se corrigen hasta este rango de humedad.

La Figura 14 muestra los valores alcanzados para la resistencia máxima en el caso de tracción y compresión paralela, observándose en ambos ensayos que los tableros fabricados en Chile alcanzan valores inferiores a los reportados para todas las condiciones del estudio de Nueva Zelanda, sin embargo, bastante cercanos al reportado para aquellos de baja rigidez.

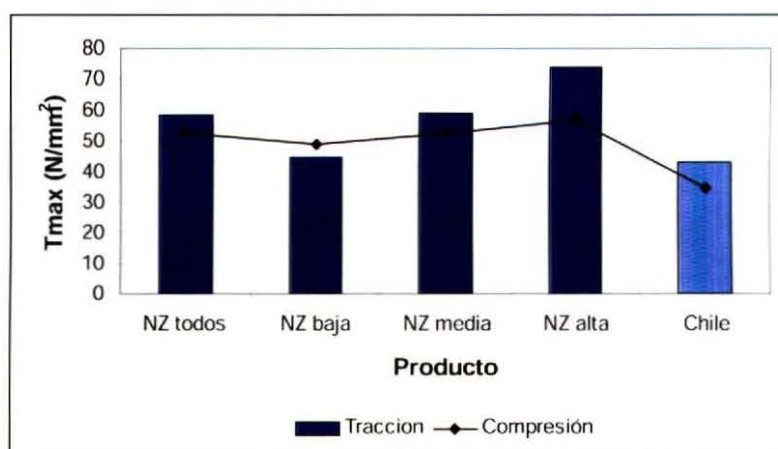


Figura 14: Resultados comparativos ensayo de tracción y compresión

5.2. Estados Unidos – Pino radiata/Combi

Otra fuente bibliográfica (Forest Products Laboratory, FPL-RP-521) señala características mecánicas de tableros fabricados con madera de Southern pine y Douglas fir. Este estudio indica que se fabricaron tableros de ambas especies con diferentes proporciones de madera juvenil, donde "1mE" corresponde a un tablero fabricado sólo con madera madura, mientras que "2j" indica que el tablero fue fabricado sólo con madera juvenil.

La Tabla 12 hace una comparación de los resultados publicados por esta fuente con los obtenidos en este estudio (pino y combi). Comparados con Southern pine se observa que los resultados de la muestra pino son mayores a los obtenidos por la muestra 2j y menores que aquellos alcanzados por la muestra 1mE. Se destaca que las muestras 1mE y 2j presentan una densidad significativamente mayor al de la muestra pino, causa que explicaría el mejor comportamiento mecánico de las muestras de Southern pine.

Al comparar la muestra pino con Douglas fir, se observa que los valores alcanzados por este estudio están bastante más cercanos a los reportados para la muestra 1mE, sin embargo, la densidad de esta última es también bastante mayor.

La muestra combi alcanza valores bastante cercanos a la muestra 1mE, tanto de Southern pine como Douglas fir, salvo en el caso de la resistencia a la tracción y el MOE. A pesar de lo anterior, se observa que la densidad de esta muestra (combi) es bastante menor que la de Southern pine o Douglas fir.

Tabla 12: Resultados comparativos para LVL fabricados en USA y Chile

Ensayo	Parámetro	Unidad	USA				Chile	
			Southern Pine		Douglas fir		Pino	Combi
			1mE	2j	1mE	2j		
Flexión cara	MOR	N/mm ²	67,01	48,19	62,01	34,03	57,96	63,05
	MOE	N/mm ²	13.124	8.819	13.749	9.027	9.179	9.555
	CH	%	12,00	11,70	12,10	11,90	10,20	11,48
	Sog	kg/m ³	630	590	520	450	456	502
	n	--	64	54	60	60	60	60
Flexión canto	MOR	N/mm ²	70,76	52,29	68,40	38,19	51,75	58,86
	MOE	N/mm ²	13.749	9.305	12.916	9.027	10.070	10.520
	CH	%	12,00	11,70	12,10	11,90	10,39	11,02
	Sog	kg/m ³	630	590	520	450	458	503
	n	--	64	54	60	60	60	60
Tracción	T _{max}	N/mm ²	51,59	36,18	49,30	20,97	27,63	32,30
	CH	%	11,80	11,60	11,90	12,20	10,18	11,15
	Sog	kg/m ³	630	590	520	450	450	500
	n	--	50	35	60	60	60	60

MOR: módulo de ruptura, MOE: módulo de elasticidad, T_{max}: resistencia máxima, CH: contenido de humedad, Sog: densidad básica

Las Figuras 14, 15 y 16 muestran el comportamiento mecánico de las diferentes muestras fabricadas en E.E.U.U. y Chile, observando que los valores alcanzados para pino y combi están dentro del rango de los valores reportados para muestras crecidas en Norteamérica. Particularmente se observa que los tableros chilenos alcanzan valores mayores al reportado para la muestra DF-2j que corresponde a tableros de madera juvenil de la especie Douglas fir.

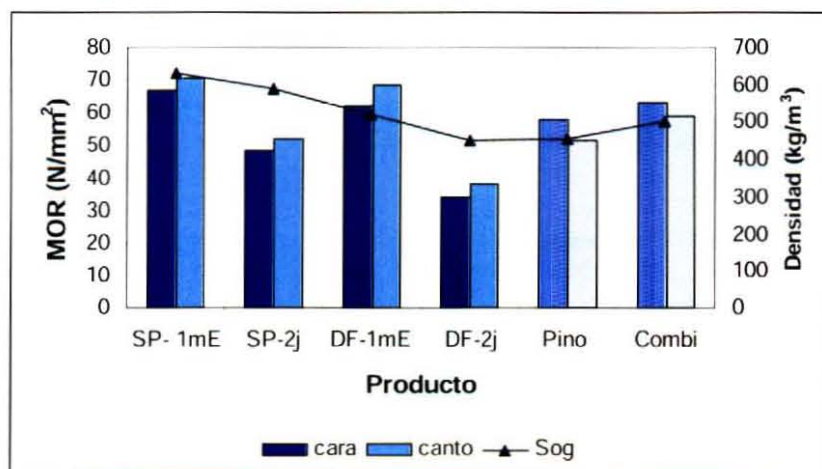


Figura 14: Análisis comparativo módulo de ruptura, ensayo de flexión cara y canto

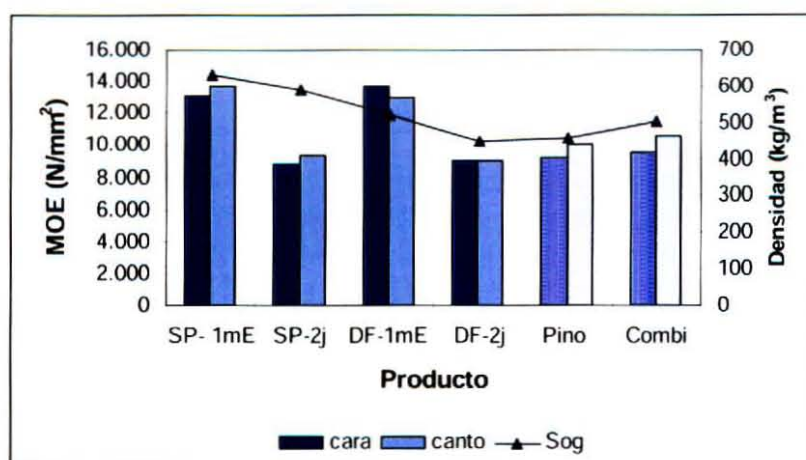


Figura 15: Análisis comparativo módulo de elasticidad, ensayo de flexión cara y canto.

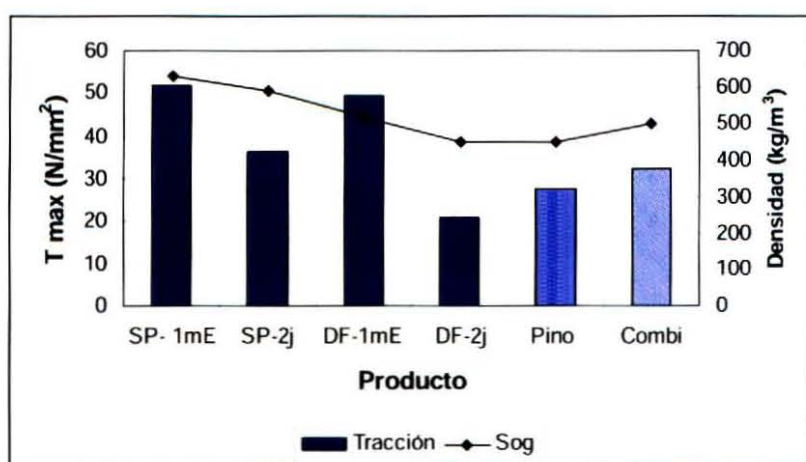


Figura 16: Análisis comparativo, ensayo de tracción

5.3. Nueva Zelanda – Pino radiata

Nelson Pine industries, empresa que fabrica LVL con láminas de pino radiata previamente clasificadas con técnicas de ultrasonido, en su reporte técnico AUS E 10 (diciembre del 2003) indica que sus productos tienen una humedad que varía entre 8 y 15%, una densidad de 550 kg/m³ y propiedades mecánicas que se indican en la Tabla 13.

Tabla 13: Resultados comparativos de LVL fabricados con pino radiata

Ensayo	Parámetro	Unidad	Nelson Pine	Chile
Flexión (cara/canto)	MOE	GPa	10,34	8,91/9,81
	MOR	MPa	38,0	37,9/36,7
Tracción	T_{max}	MPa	22,0	22,2
Compresión perpendicular				
Condición cara	T_{max}	MPa	12,0	16,6
Condición canto	T_{max}	MPa	12,0	14,6
Compresión paralela	T_{max}	MPa	35,0	25,9
Cizalle	T_{max}	MPa	4,8	4,6

Valores informados corresponden a valores característicos

Los valores alcanzados por la muestra pino presentan un mejor comportamiento mecánico frente a esfuerzos de compresión perpendicular (cara y canto) y tracción. En flexión, si bien el catálogo técnico no indica si el ensayo reportado corresponde a flexión cara o canto, los valores del módulo de ruptura son bastante cercanos en ambos casos. El módulo de elasticidad y el esfuerzo de cizalle es levemente menor, mientras que en compresión paralela, los valores de los tableros chilenos son alrededor de un 70% menores que los informados.

6. CONCLUSIONES

- Entre las muestras ensayadas de pino, combi y eucalyptus, esta última especie presenta un comportamiento mecánico significativamente mayor. Las muestras de Pino y Combi presentan propiedades mecánicas similares.
- El adhesivo fenólico utilizado para la fabricación de las muestras cumple con las especificaciones mínimas indicadas para el test de delaminación. En el ensayo de cizalle los valores de resistencia están por debajo del mínimo indicado como requerimiento, sin embargo, el alto valor de desgarro alcanzado recomienda repetir el ensayo al menos para las muestras combi y eucalyptus.
- Los tableros fabricados con pino y mezcla presentan un comportamiento mecánico bastante cercano al reportado por estudios realizados en USA (Southern pine, Douglas fir).
- El comportamiento mecánico alcanzado por los tableros de eucalyptus presenta valores muy próximos a los reportados por estudios en Nueva Zelanda.

7. BIBLIOGRAFIA

- ASTM D 5456 "Standard specification for evaluation of structural composite lumber".
- ASTM D 4761 "Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material".
- ASTM D 2559 "Adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (wet use) exposure conditions".
- Eucalyptus nitens en Chile: Primera monografía Informe Técnico N° 165, Instituto Forestal, 2004.
- Forest Products Laboratory FPL-RP-521 Effect of various proportions of juvenile wood on laminated veneer lumber (1993).
- Manual de Construcciones en Madera N° 10, volumen N°1, 2^{da} edición, noviembre 1991.
- Nelson Pine Report 03 Desing guides & Span tables, December 2002.
- New Zeland Journal of Forestry Science 33(1):114-125 Eucalyptus nitens laminated veneer lumber structural properties (2002).

CAPÍTULO III

LVL FROM MACHINE GRADED EUCALYPTUS NITENS AND RADIATA PINE VENEER

Andre Klemarewski¹

1. INTRODUCTION

Infor – Instituto Forestal is the leading forest products research institute in Chile. One of Infor projects is to evaluate feasibility of making Laminated Veneer Lumber (LVL) from plantation Radiata Pine and Eucalyptus Nitens. Chile is a major producer of forest products and has vast forest plantations. In recent years there has been large increase in production of Plywood from Radiata Pine. This product has been successfully exported worldwide. LVL like Plywood is made from rotary peeled veneers but with all plies aligned parallel to each other. Veneer production process for LVL is the same as for Plywood, with exception for veneer grading. Since LVL is a structural product used for beams, headers and flanges in I-joist, it has to meet certain strength criteria. Therefore just visual grading of veneer is not sufficient and veneer for LVL is machine stress graded. LVL lay up and pressing is also different than in Plywood production. LVL billets are made in large dimensions up to 90 mm thick, 1200 mm wide and 23 m long. In the last process LVL is sawn to market dimensions. LVL production and its use has been growing worldwide for the last 20 years and is projected continue to grow for a foreseeable future. The largest production and consumption of LVL is in North America. Any new LVL producer and exporter would have to meet North American market requirements in order to compete with domestic products.

Presently, all veneer used for structural LVL is machine graded. The most popular method of grading is by measuring the Ultrasonic Propagation Time (UPT), which is directly related to veneer Modulus of Elasticity (MOE) and its density. Metriguard Company located in Pullman, Washington, USA, commercialized this method. Ultrasonic veneer tester model 2650 has been industry standard and there are over 150 machines installed worldwide. Another method of indirect veneer MOE measurement was developed in Finland. This method measures wood density and its moisture content (MC) by passing veneer through a Radio Frequency (RF) field. The newest Metriguard veneer grading machines Model 2800 DME combine both UPT and RF density measurement method for more accurate MOE calculations.

Infor has made and tested LVL from Eucalyptus Nitens and Radiata Pine visually graded veneer. Visual grading is not accurate and cannot predict veneer strength. Presently there is no veneer grading machines in Chile. In order to machine grade veneer and optimise LVL properties Infor has contracted Applied Composites Technologies (ACT) to carry out proper testing with Eucalyptus and Pine veneer samples shipped from Chile. Veneer grading was carried out at Metriguard plant in Pullman, Washington and LVL lay up, pressing and bending strength testing was done at Washington State University, Wood Engineering Laboratory also located in Pullman.

¹ Licenced Mechanical Engineer and Senior Associate with Leonard Guss Associates, Inc. U.S.A.

2. MACHINE VENEER GRADING

Veneer grading was carried out on 2800 DME veneer tester at Metriguard plant in Pullman Washington, USA. 2800 DME machine measures ultrasonic wave velocity along the grain average wood density and MC, and uses these values to calculate veneer MOE in bending.

The fundamental equation for MOE calculation is:

$$MOE = q v^2$$

Where:

MOE – Modulus of Elasticity (stiffness), E in short

q – wood specific gravity (we also use term wood density)

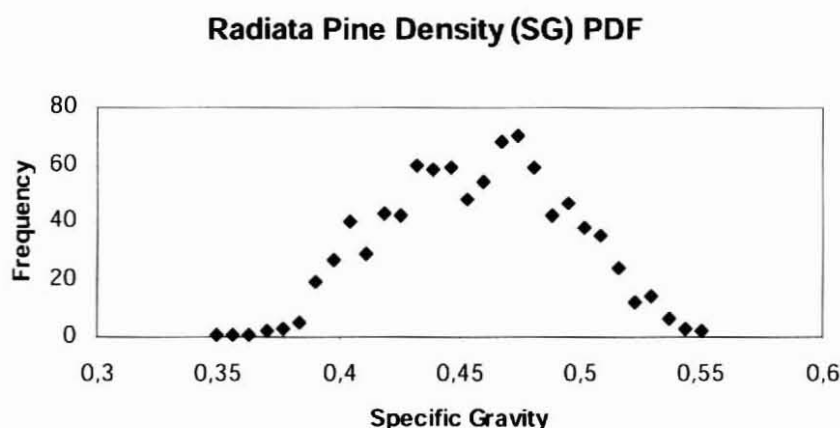
v – ultrasonic wave velocity

The sound wave velocity is affected by wood density, MC, wood temperature, slope of grain, knots and other defects. The measurement is carried out between two wheels. One wheel is a sound generator and the other one is a receiver. There are about 120 measurements per second and an average number corresponding to travel time in milliseconds is displayed and stored in a computer. The UPT number is relative to specific wood species, grain angle and others veneer qualities, and can not be used for direct LVL strength calculations. There is, however, good correlation between UPT number and LVL strength for each specific species and conditions. Until a direct method for measuring wood density was developed an average number was used for wood density (q). RF method measures a shift in resonant frequency when veneer passes through an RF field of a resonant cavity and relates it to wood density and MC. The final result is more accurate MOE (E) indirect measurement and more consistent LVL strength properties from graded veneer.

2.1. Radiata Pine Machine Veneer Grading Results

In total 913 sheets of Radiata Pine were graded. Average veneer thickness was 2.48 mm and sheet size was 1300 mm x 2550 mm. An average veneer MC measured by 2800 DME machine was 4.0%. Average veneer specific gravity (SG) was 0.454. SG distribution bell curve showed longer than normal tail on the low-density side. There were some veneer sheets with SG as low as 0.355. Veneer with such a low density has very poor strength values and is normally eliminated from use in structural LVL. It was decided that veneer with SG below about 0.40 and corresponding E of 8965 Mpa (1.30 Mpsi – millions of pounds per square inch) be eliminated from the test.

Chart 1. Radiata Pine Density Distribution.



After passing through a grading machine each sheet number was marked together with corresponding E as determined by machine. All other data (density, MC, dimensions) were recorded on a computer. After grading, E numbers in a computer file were arranged in an ascending order and divided into three even groups.

The veneer grade thresholds after eliminating low density veneer are presented in the table below .

Table 1. E Value Grade Division for Radiata Pine Veneer

Radiata Pine Veneer Grade	E Machine Value
Grade 1 (G1)	Over 13,240 Mpa (1.92 Mpsi)
Grade 2 (G2)	11,240 to 13,240 Mpa (1.63 to 1.92 Mpsi)
Grade 3 (G3)	Below 11,240 Mpa (1.63 Mpsi)

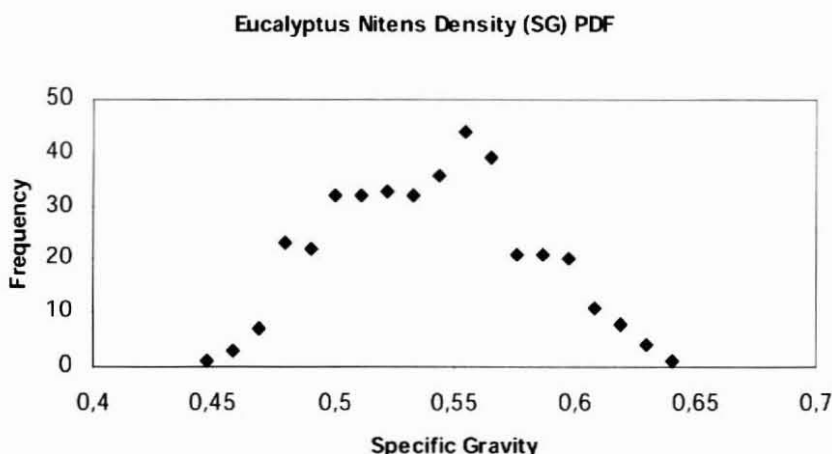
Radiata Pine veneer quality in general was very good. Veneer surface was smooth with very shallow lathe checks. Veneer sheets were solid with a few splits. Veneer of this quality would be very suitable for processing on modern high production LVL lines.

2.2. Eucalyptus Nitens Machine Grading Results

Eucalyptus veneer quality in general was very poor. Veneer sheets were wavy with many long end splits. Some splits indicated peeler block splitting prior to peeling. Fast growing Eucalyptus is known to develop growth stresses, which result in log end splitting after cross cutting. Some narrow splits indicated rapid end shrinkage during drying. Drying of Eucalyptus requires different drying schedules than softwood species. In general a drying temperature should be much lower, humidity inside a dryer high and drying time longer than for softwood veneer of the same thickness. Random MC check indicated that Eucalyptus veneer had high MC spot of up to 20% MC. Veneer with MC over 8% can not be used for hot pressing and veneer with MC over 12% can not be machine graded. All Eucalyptus veneer had to be re-dried prior to machine grading. Veneer was re-stacked with lumber stickers separating every four veneer sheets and fans installed to allow for air flow for accelerated ambient drying. After 48 hours of re-drying all veneer was below 10% MC and suitable for machine grading.

In total 393 sheets of Eucalyptus were machine graded. Average veneer thickness measured by 2800 DME machine was 2.34 mm and average MC was 6.5%. Average veneer specific gravity was 0.534.

Chart 2. Eucalyptus Nitens Density Distribution.



E values for Eucalyptus veneer were sorted in ascending order and divided into three even groups. Grade thresholds are presented in Table 2.

Table 2. E Value Grade Division for Eucalyptus Nitens Veneer

Eucalyptus Nitens Veneer Grade	E Machine Value
Grade 1 (G1)	Over 14,690 Mpa (2.13 Mpsi)
Grade 2 (G2)	12,897 to 14,690 Mpa (1.87 to 2.13 Mpsi)
Grade 3 (G3)	Below 12,897 Mpa (1.87 Mpsi)

2.3. Conclusions from Machine Veneer Grading

The following conclusions can be drawn from machine grading of Radiata Pine and Eucalyptus Nitens veneer:

- Average density and calculated MOE of Eucalyptus Nitens veneer is higher than that of Radiata Pine.
- Machine calculated E value for 33% of Pine veneer indicated that it might be possible to produce LVL with desirable 13800 Mpa or 2.0 Mpsi MOE value.
- Machine calculated E value for up to 66% of Eucalyptus veneer indicated that it might be possible to produce LVL with desirable 13800 Mpa or 2.0 Mpsi MOE value.
- Pine veneer quality is suitable for handling by automated high speed LVL equipment.
- Large portion of Eucalyptus veneer was of poor quality and unsuitable for high production automated LVL equipment.

3. LVL LAY UP AND PRESSING

3.1 Veneer Preparation

Graded veneer was transported to Washington State University Wood Materials and Engineering Laboratory. Veneer MC was verified with oven drying method on a few randomly picked veneer sheets from each species. Average MC for Radiata Pine veneer was 6.5% and for Eucalyptus Nitens it was 5.9 %. It is required that veneer for LVL pressing be not higher than 8% MC. Our veneer was below that target and suitable for hot pressing.

For each species veneer was segregated into three grades as specified in Table 1 and Table 2. Due to limited width of a roller spreader glue applicator, veneer sheets were split in half (60 cm width) along the grain prior to lay up.

2.2 Glue Application and Lay up

Adhesive used for LVL preparation was supplied by Hexion Specialty Chemicals. It was commercial LVL adhesive based on Phenol Formaldehyde (PF) resin normally used for Douglas Fir veneer. Product designation was Cascophen WS-822-69, total solids content was 41% and viscosity was 1720 cPs.

Glue was applied with a roller spreader to the top side of veneer. Glue application rate was between 147 and 157 g/m². Initially a higher glue spread rate was applied in control Pine panels but this resulted in steam blisters.

Each LVL panel consisted of 13 veneers of the same species and veneer grade.

2.3 Hot Pressing

LVL panel were hot pressed one at a time in a single opening 1.3 m x 2.8 m hot press. Hot press was controlled with PressMAN program, which allows for very precise time/pressure adjustments. Press platen temperature was 146 degrees C and maximum pressure on product was 1.72 MPa (250 psi). Commercial LVL hot presses normally operate between 145 and 160 C, and the maximum pressure is between 1.50 and 2.10 MPa.

The inner glue line temperature was monitored with a thermocouple. Target PF glue curing temperature was 100 C. Total press time was between 13 and 14 minutes. A typical pressing curve for Pine LVL panel is presented in Figure 1.

Ten panels for each veneer grade were pressed. Hot pressed panels were stacked and stored for several days before sawing.

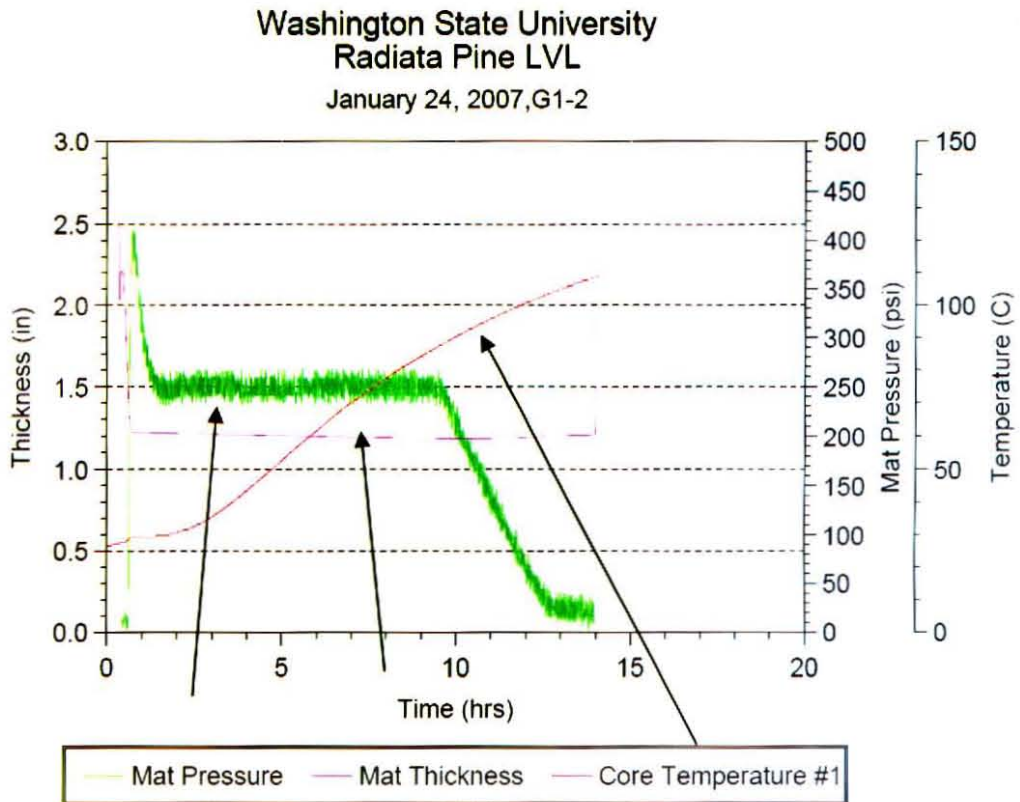


Figure 1. A typical pressing curve for Radiata Pine 30 mm LVL panel.

4. LVL BENDING TEST

At least two 90 mm wide samples were cut from each panel. One sample was used for flat (plank) bending test and one sample was used for edge (joist) bending test. Bending test was carried out according to ASTM D4761: Standard Test Method For Mechanical Properties of Lumber and Wood Based Structural Products. Sample depth to span ratio was 19:1 for edgewise bending test and 32:1 for flatwise bending test.

Average Pine LVL MC was around 8.0% and average Eucalyptus LVL MC was 10%. The standard requires that samples be brought to equilibrium moisture content in a conditioned environment of 20 C and 65% relative humidity. This procedure takes several weeks to accomplish and is not done in commercial LVL Quality Control laboratories. It is expected that LVL equilibrium MC conditioned in 20 C and 65% relative humidity be between 9 and 11%. Since MC of our samples was very close to these values, bending strength values were left without adjustments.

5. LVL BENDING TEST RESULTS

5.1 Radiata Pine LVL Bending Test Results

Average bending test results for Radiata Pine LVL are presented in Table 3 and Table 4. Average veneer MOE values obtained during machine grading are also included for comparison. Average Pine LVL thickness was 31.5 mm.

Table 3. Radiata Pine LVL Edgewise Bending Test Results

Grade	LVL MOE (psi)	LVL MOE (Mpa)	Veneer MOE (Mpa)	LVL MOR (psi)	LVL MOR (Mpa)	LVL Density (kg/m ³)
G1	1,953,000	13,469	14,276	10,220	70	561
G2	1,669,000	11,510	12,345	8,690	60	534
G3	1,447,000	9,979	10,069	7,560	52	519

Table 4. Radiata Pine LVL Flatwise Bending Test Results

Grade	LVL MOE (psi)	LVL MOE (Mpa)	Veneer MOE (Mpa)	LVL MOR (psi)	LVL MOR (Mpa)	LVL Density (kg/m ³)
G1	2,227,000	15,359	14,276	12,270	85	565
G2	1,952,000	13,462	12,345	10,460	72	543
G3	1,611,000	11,110	10,069	8,320	57	517

5.2 Eucalyptus Nitens LVL Bending Test Results.

Average bending test results for Eucalyptus Nitens LVL are presented in Table 5 and Table 6. Average veneer MOE values obtained during machine grading are also included for comparison. Average Eucalyptus panel thickness was 29.5 mm, which is less than Pine panel thickness. This difference was mainly due to thinner Eucalyptus veneer in comparison to Pine veneer.

Table 5. Eucalyptus Nitens LVL Edgewise Bending Test Results

Grade	LVL MOE (psi)	LVL MOE (Mpa)	Veneer MOE (Mpa)	LVL MOR (psi)	LVL MOR (Mpa)	LVL Density (kg/m ³)
G1	2,349,000	16,200	15,931	13,050	90	706
G2	2,030,000	14,000	13,586	11,310	78	658
G3	1,725,500	11,900	11,586	9,512	66	626

Table 6. Eucalyptus Nitens LVL Flatwise Bending Test Results.

Grade	LVL MOE (psi)	LVL MOE (Mpa)	Veneer MOE (Mpa)	LVL MOR (psi)	LVL MOR (Mpa)	LVL Density (kg/m ³)
G1	2,726,000	18,800	15,931	14,500	100	706
G2	2,407,000	16,600	13,586	13,050	90	658
G3	2,102,500	14,500	11,586	11,600	80	626

6. DISCUSSION

The results from machine veneer grading and LVL bending test demonstrate that there is a wide spread in veneer strength properties within each species. It is clear that machine stress grading of Radiata Pine and Eucalyptus Nitens veneer will be necessary in order to produce a commercial grade LVL with predictable engineered properties. The new generation of 2800 series veneer grading machine allows for more accurate veneer MOE measurement. Veneer E measurements correspond fairly well with LVL E in bending but can not be used as an absolute value. As expected LVL MOE and MOR in flatwise direction was higher than edgewise values for both species. This can be attributed to densification effect of outside veneer plies in contact with hot platens. The above values are averages of 10 bending test results only and can be used only as an indication of expected strength results. In order to achieve statistically meaningful results, at least 52 samples would have to be tested.

Commercial LVL design values are normally presented as average values for MOE. An allowable design stress for LVL beams (Fb) is calculated by taking the 5th percentile of MOR value and reducing it further by a safety factor. Therefore Fb values in LVL producers design tables are much lower than average values presented in this report. For beam LVL applications the most important value is its average edgewise stiffness or E. In North America the desired E value is 2.0 million psi or 13,800 Mpa. The results of this test indicate that at up to 33% of Radiata Pine veneer can meet this strength requirement. The results for Eucalyptus Nitens are even better and indicate that up to 66% of veneer could produce 2.0 E LVL. Majority of Eucalyptus veneer used for this test would not be suitable for use in high speed automated LVL systems. Veneer was wavy with many wide and long splits, which made it very prone to breakage. Proper block treatment and veneer processing parameters would have to be established if Eucalyptus Nitens is considered for commercial LVL production. Eucalyptus high density and its high strength create an opportunity for mixing it with lower density Pine veneer in order to obtain high strength LVL. Radiata Pine veneer quality was very good.

Most LVL producers use 3.2 mm and thicker veneer. The advantages are less veneer handling and lower glue consumption. It would be very beneficial to perform a similar test in the future with 3.2 mm Pine and Eucalyptus veneer.

7. CONCLUSIONS

- Tested veneer sheets of Radiata Pine and Eucalyptus Nitens displayed a wide range of densities and strength.
- Both species can be successfully machine strength graded using a commercial ultrasonic/RF technology.

LVL: VIGAS DE CHAPAS LAMINADAS CON MATERIAS PRIMAS CHILENAS

- Veneer machine strength grades corresponded well with LVL grades strength.
- Eucalyptus Nitens veneer and LVL has higher density and strength than Radiata Pine veneer and LVL.
- Veneer grading and LVL tests demonstrated that up to 33% of Pine veneer can make desirable 13800 Mpa E LVL and up to 66% of Eucalyptus veneer can make this LVL grade.
- Large portion of Eucalyptus veneer was of poor quality and would not be suitable for processing on commercial LVL lines.
- All Radiata Pine veneer was of good quality and suitable for commercial LVL application.

8. RECOMMENDATIONS

- Carry out a similar test of grading veneer and LVL pressing and strength testing with 3.2 mm thick veneer.
- Identify process problems with Eucalyptus Nitens veneer and investigate process changes for achieving good quality veneer.

APPENDIX 1 – TEST RESULTS CHARTS

Chart 3 - Radiata Pine LVL MOE in Edgewise Bending

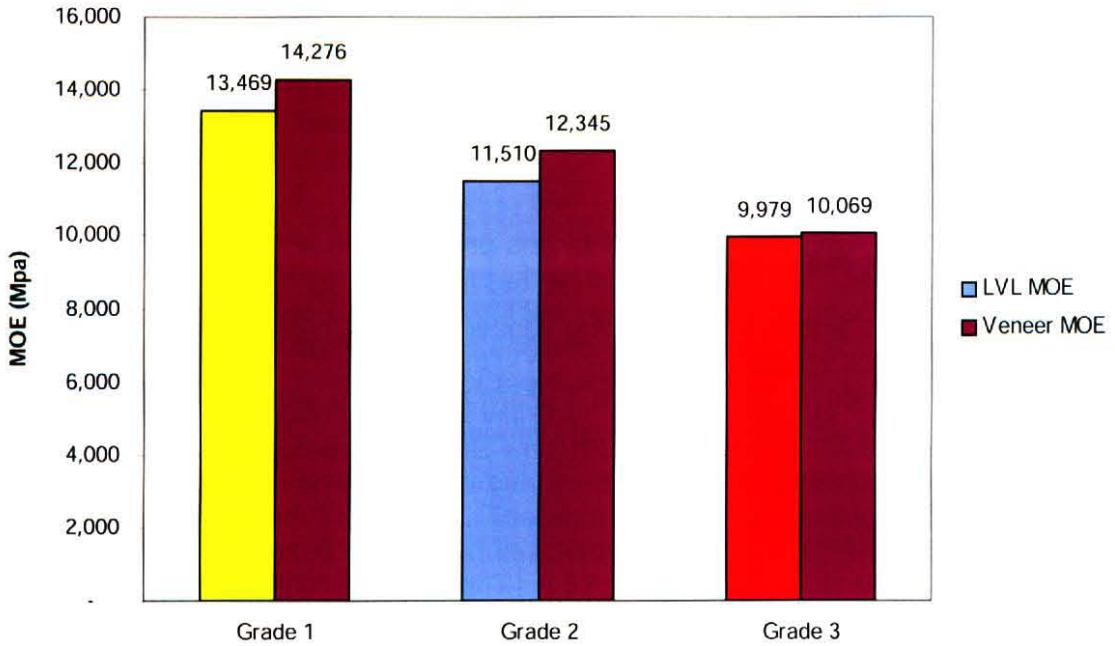


Chart 4 - Radiata Pine LVL MOE in Flatwise Bending

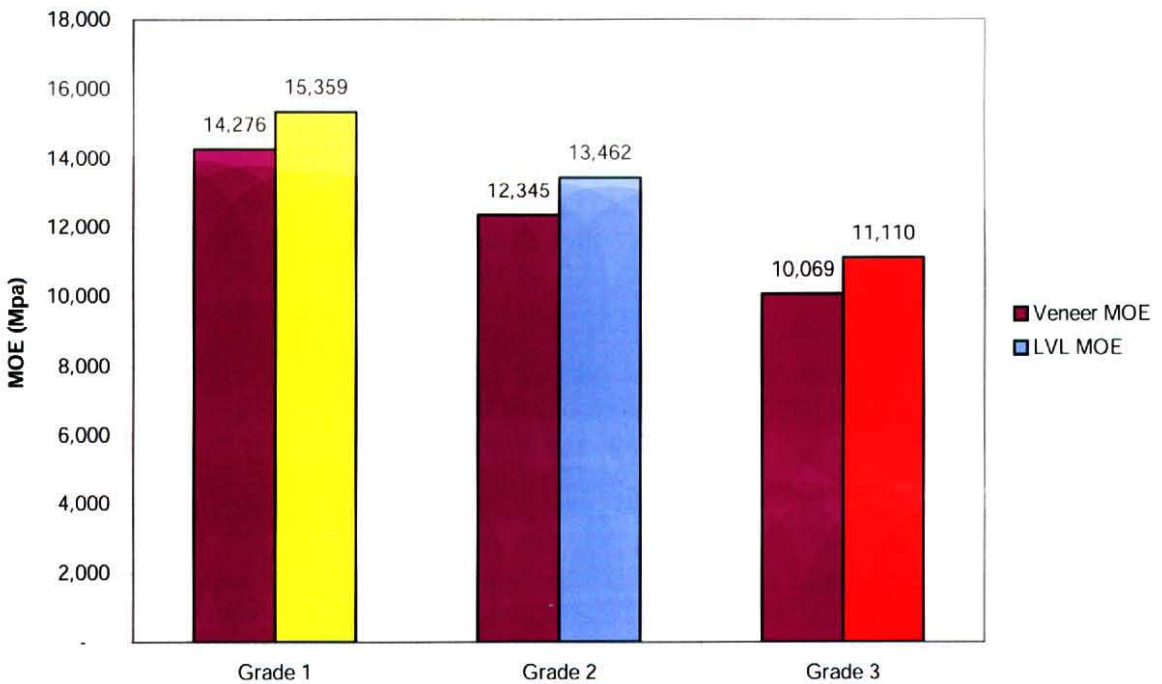


Chart 5 - Radiata Pine LVL MOR in Edgewise Bending

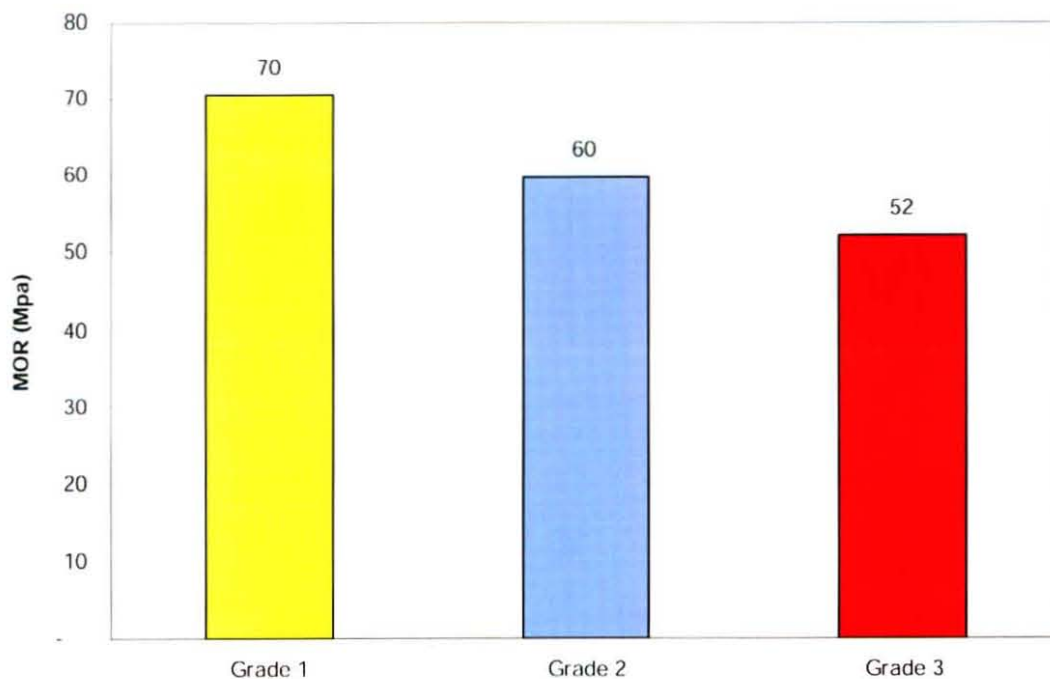


Chart 6 - Radiata Pine LVL MOR in Flatwise Bending

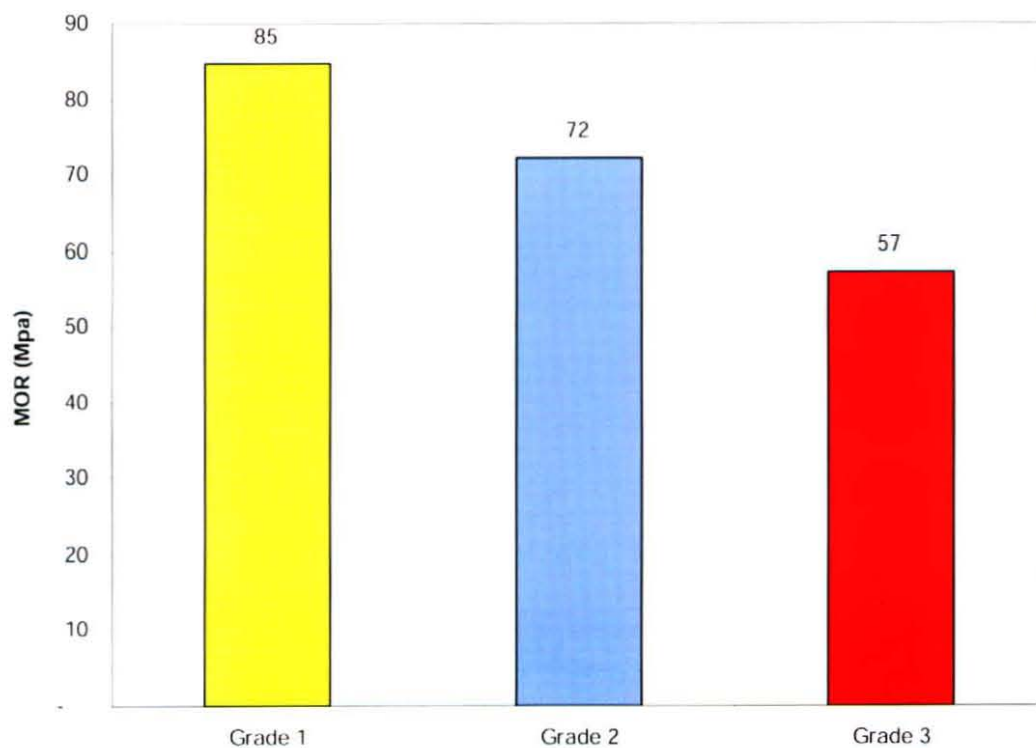


Chart 7 - Eucalyptus Nitens LVL MOE in Edgewise Bending

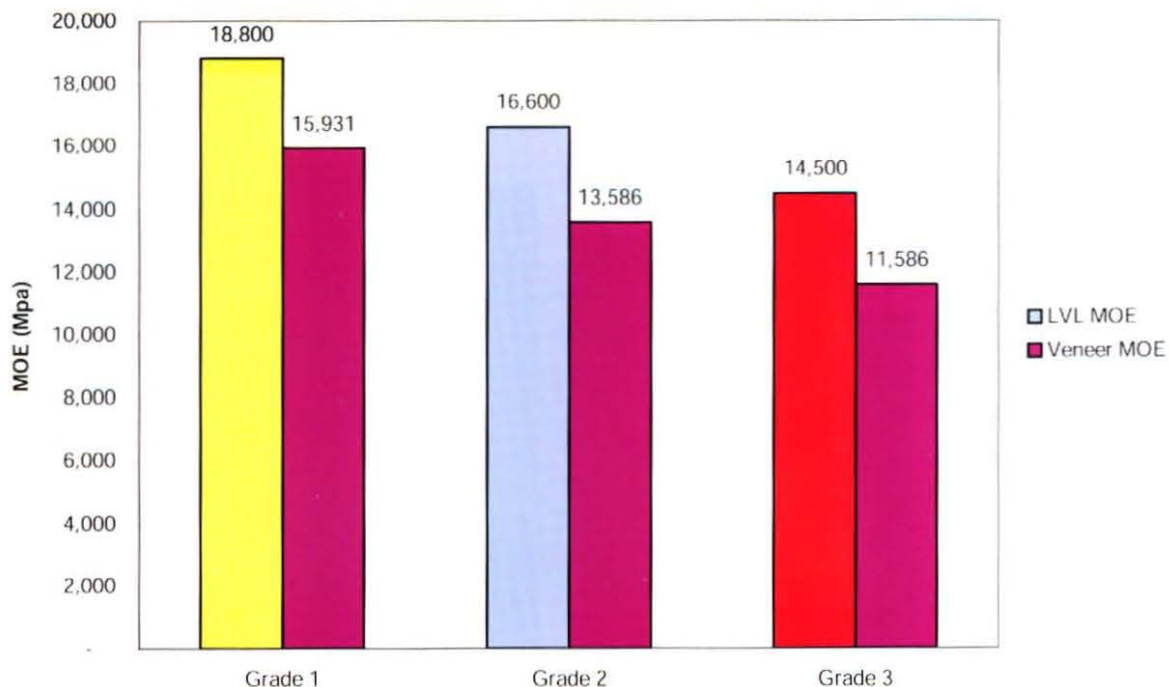


Chart 8 - Eucalyptus Nitens LVL MOE in Flatwise Bending

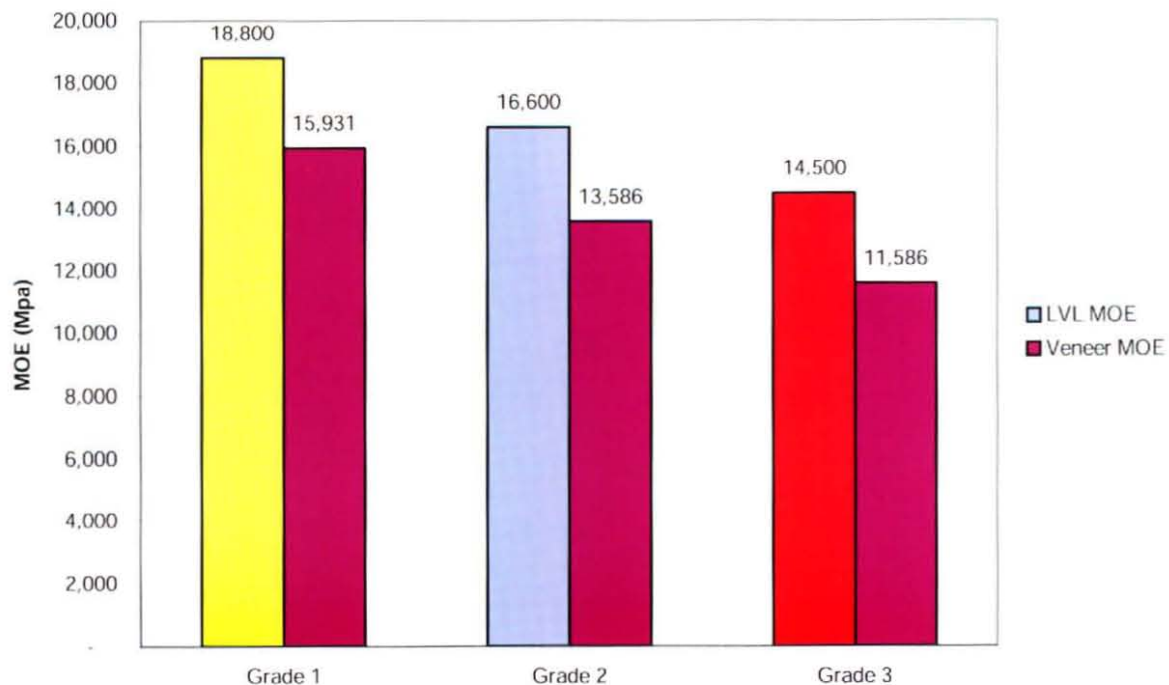


Chart 9 - Eucalyptus Nitens LVL MOR in Edgewise Bending

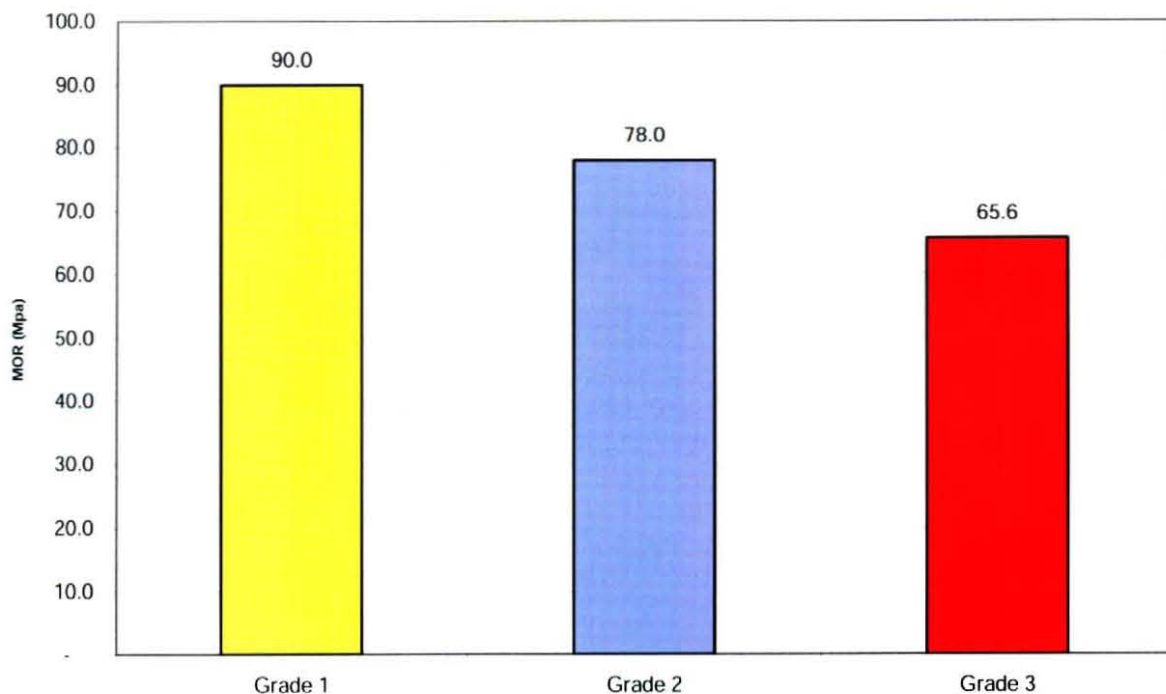
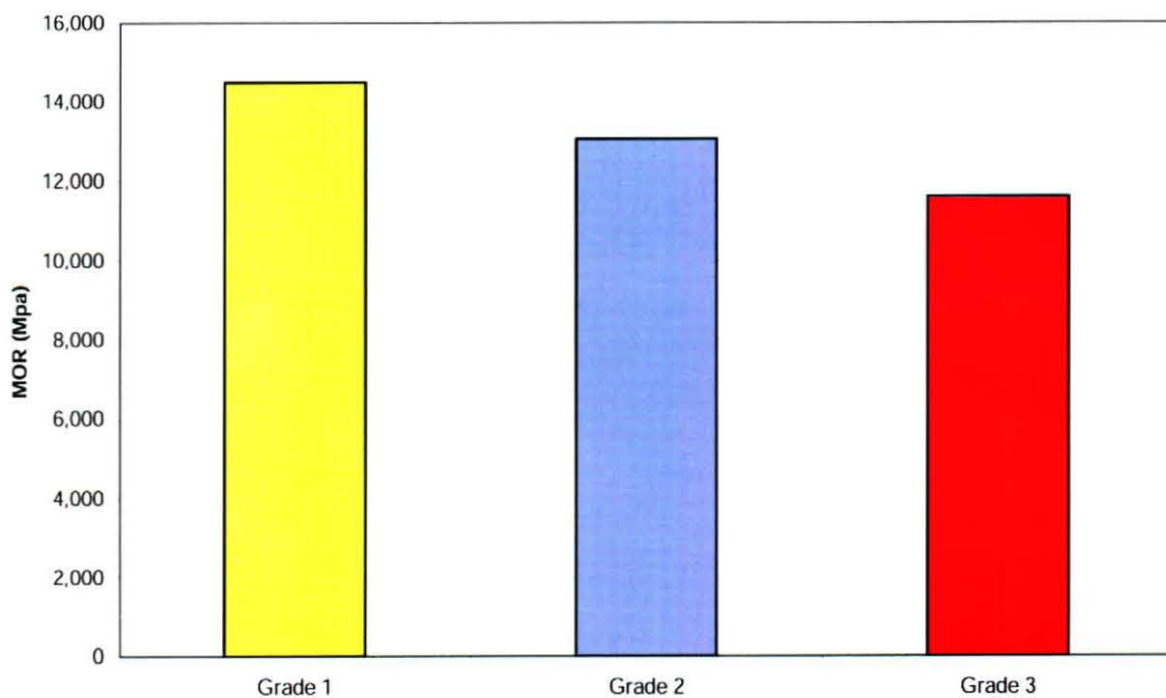


Chart 10 - Eucalyptus Nitens LVL MOR in Flatwise Bending



APPENDIX 2 - TEST PHOTOGRAPHS



General view of veneer grading set up at Metriguard plant.



Front view of 2800 DME veneer grading machine.

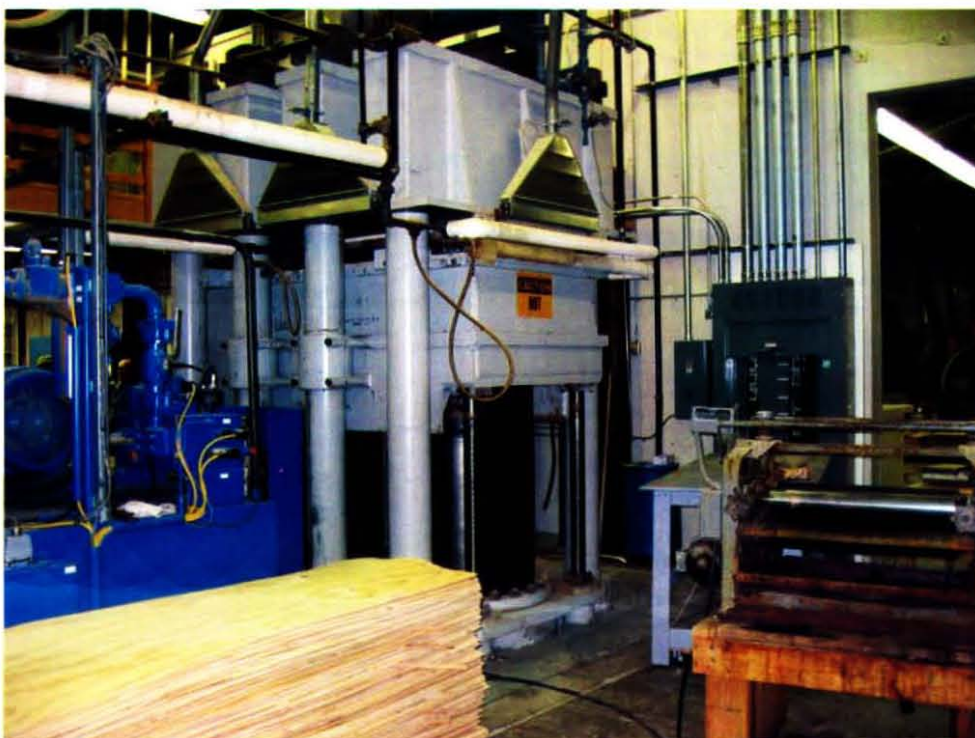
LVL: VIGAS DE CHAPAS LAMINADAS CON MATERIAS PRIMAS CHILENAS



Re-drying of Eucalyptus Nitens veneer.



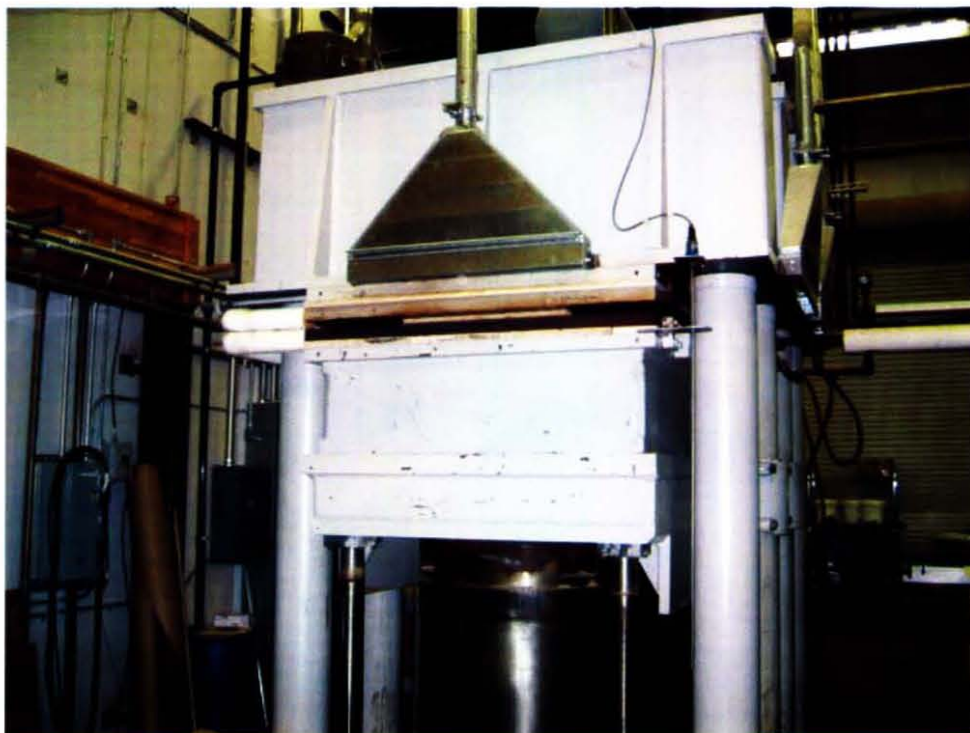
Eucalyptus Nitens after grading.



LVL preparation laboratory set up with Pine veneer on the left, hot press in the center and glue applicator to the right.



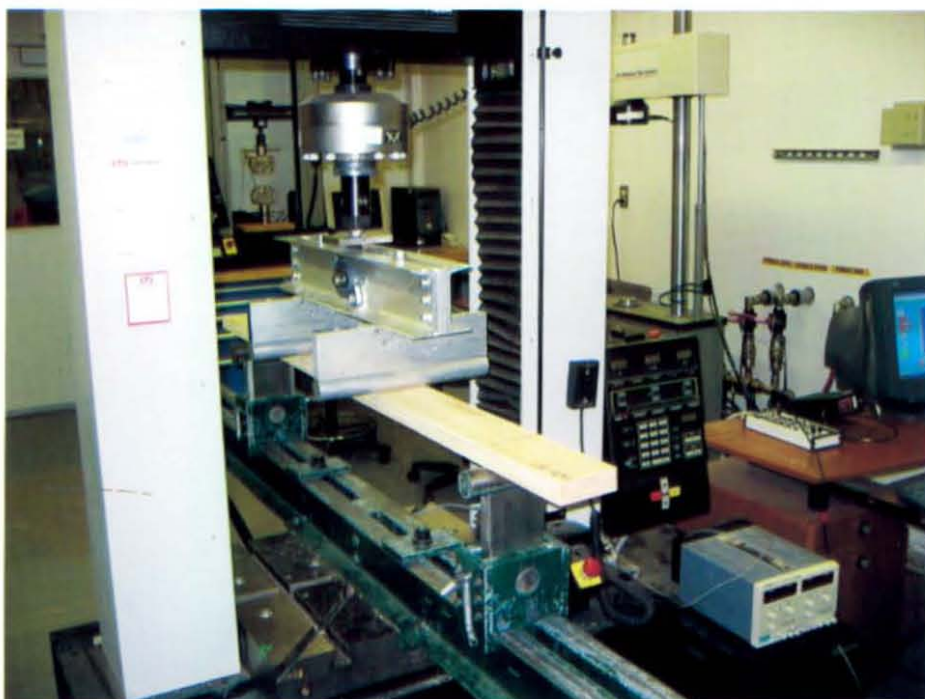
Laid up Pine panel ready for hot pressing.



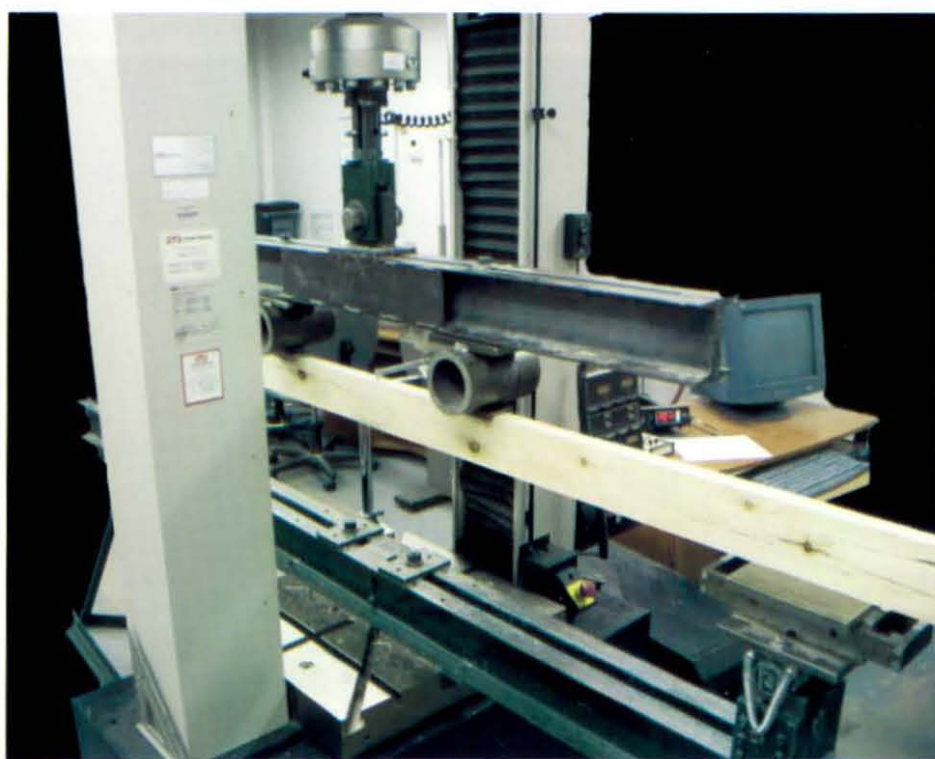
LVL in a single opening hot press.



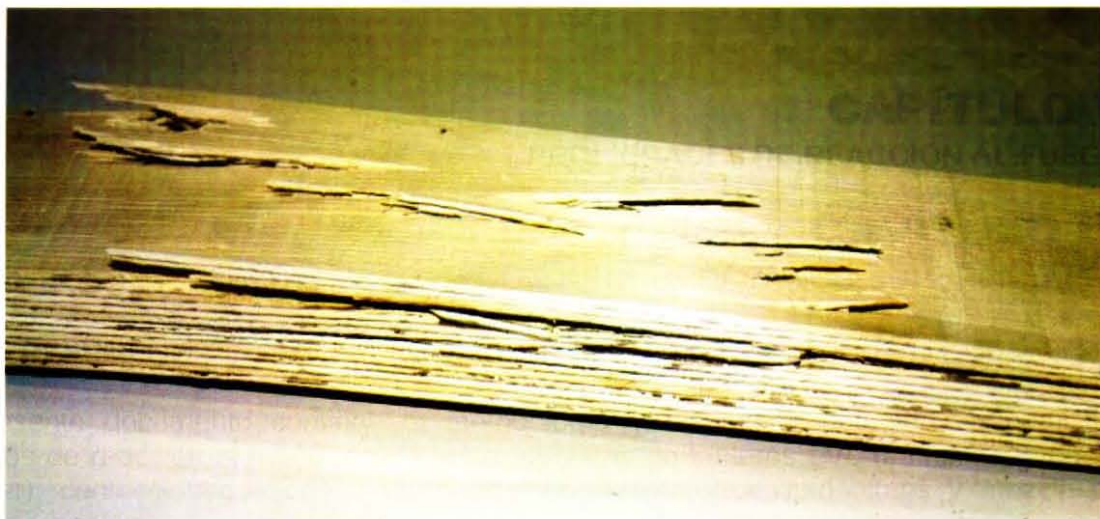
Pressed Pine LVL panels.



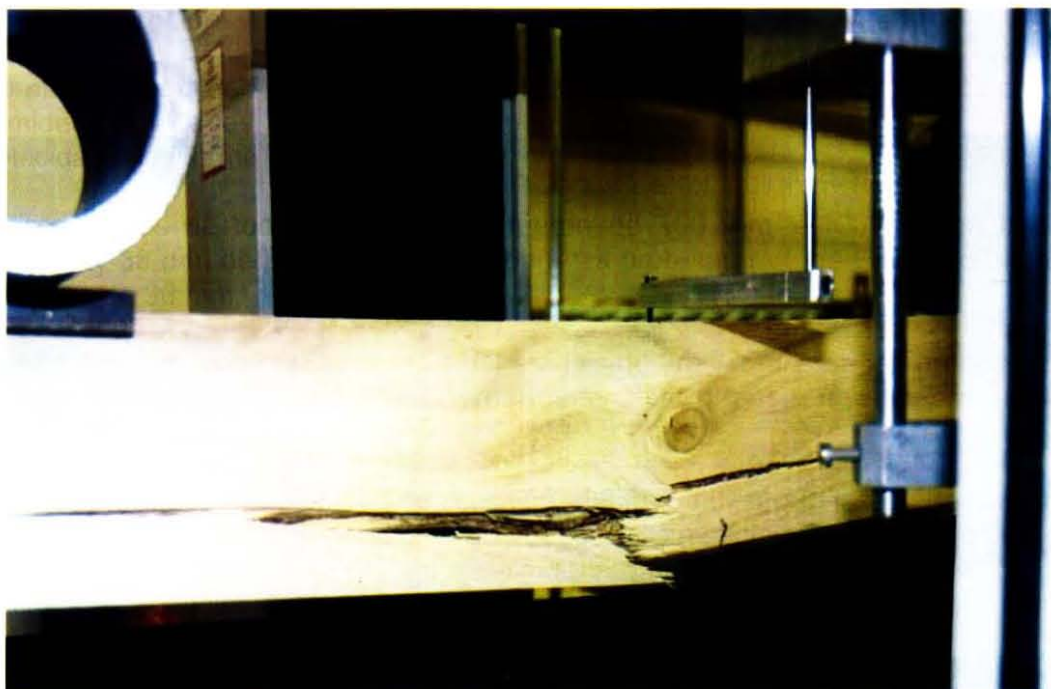
Flatwise bending test set up.



Edgewise bending test set up.



Typical Eucalyptus failure in flatwise bending.



Typical Eucalyptus failure in edgewise bending.



Typical Radiata Pine failure in flatwise bending.



Typical Radiata Pine failure in edgewise bending.