

Alternativas para dar valor agregado a la madera nacional proveniente de árboles de raleos comerciales

Vigas laminadas (GLULAM) y Madera Microlaminada (LVL)



Setiembre 2009

Departamento de Proyectos Forestales



Procesamiento y realización del presente trabajo

- Per. Agrónomo Hugo O'Neill, Consultor Sr. del Departamento de Proyecto Forestales del LATU.
- Ing. Agrónomo Sebastián Quagliotti, Consultor del Departamento de Proyecto Forestales del LATU.

Integración del equipo técnico:

- Dr. Sadaaki Ohta, Responsable técnico del proyecto y asesor permanente del Departamento de Proyecto Forestales del LATU.
- Ing. Químico. Raúl de Castro, Jefe del Departamento de Proyecto Forestales del LATU.
- Per. Agrónomo Hugo O'Neill, Consultor Sr. del Departamento de Proyecto Forestales del LATU.
- Ing. Agrónomo Sebastián Quagliotti, Consultor del Departamento/ de Proyecto Forestales del LATU.
- Téc. Agropecuario Felipe Tarigo, Consultor Jr. del Departamento de Proyecto Forestales del LATU.
- Ing. Químico Andrés Ono, Consultor Sr. del Departamento de Proyecto Forestales del LATU.
- Téc. Mecánico Dilvar Silva, Supervisor de mantenimiento del Departamento de Proyecto Forestales del LATU.
- Bachiller Francisco Gatto, Asistente Técnico del Departamento de Proyecto Forestales del LATU.
- Ing. Agrónomo Ismael Fariña, Asistente Técnico Contratado por el PDT.
- Bachiller Arturo Iglesias, Asistente Técnico Contratado por el PDT.
- Ing. Agrónomo Alejandro Casamayou, Asistente Técnico Contratado por el PDT.

Agradecimientos

Al Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT), a la empresa URUPANEL S.A, a la Caja de Pensiones y Jubilaciones Bancarias, a las empresas COFUSA y URUFOR S.A, a la empresa RAICES S.R.L (Palo Sólo), a la empresa DELMONTE S.A y al equipo de técnicos del sector Proyectos Forestales del LATU.

TABLA de CONTENIDO

Resumen.....	1
1. Introducción.....	2
2. Descripción de los materiales utilizados	3
3. Métodos utilizados para Madera Sólida	5
3.1 Ensayos destructivos y no destructivos realizados	5
3.2 Ensayos en el monte en árboles en pie.....	6
3.3 Ensayos en el monte de 30 árboles apeados y de 60 trozas.....	6
3.4 Ensayos no destructivos en 40 trozas verdes destinadas al aserrado .	8
3.5 Aserrado de las trozas y secado de las tablas	9
3.6 Ensayos no destructivos en tablas verdes	11
3.7 Ensayos destructivos y no destructivos en tablas secas	11
4. Diagrama de ejecución de la Fabricación y Evaluación de Calidad de Vigas laminadas	12
5. Diagrama de ejecución de la Fabricación y Evaluación de Madera microlaminada (LVL).....	13
6. Materiales y métodos para Vigas las Laminadas y Encoladas	14
6.1 Definición Vigas laminadas	14
6.2 Breve reseña histórica.....	14
6.3 Ventajas y desventajas de la madera laminada.....	15
6.3.1 Ventajas.....	15
6.3.2 Desventajas	16
6.4 Usos.....	16
6.5 Adhesivos utilizados.....	16
6.6 Madera utilizada para fabricar las vigas laminadas y encoladas.....	17
6.7 Proceso de Fabricación	18
6.7.1 Clasificación y saneado.....	18
6.7.2 Fabricación de las láminas.....	19
6.7.3 Cepillado de las láminas.....	20
6.7.4 Armado en seco	20
6.7.5 Encolado	22
6.7.6 Prensado	23
7. Materiales y métodos para Madera microlaminada (LVL).....	25

7.1 Definición de LVL	25
7.2 Breve Reseña histórica.....	26
7.3 Ventajas de la Madera Microlaminada	27
7.3.1 Las ventajas respecto a la madera aserrada:	27
7.3.2 Las ventajas respecto a la madera contrachapada:.....	27
7.4 Usos.....	27
7.5 Adhesivo utilizado.....	27
7.6 Madera utilizada para fabricar LVL	28
7.7 Proceso de Fabricación	28
7.7.1 Macerado o Vaporizado	28
7.7.2 Debobinado.....	29
7.7.3 Secado.....	32
7.7.4 Clasificación de las chapas.....	33
7.7.5 Encolado y Armado de los tableros.....	34
7.7.6 Prensado en frío	35
7.7.7 Prensado en caliente.....	36
8. Evaluación de la calidad de los productos de ingeniería	37
8.1 Tableros de madera Microlaminada (LVL)	37
8.1.1 Rectitud de los cantos	37
8.1.2 Planicidad	37
8.1.3 Confección de Probetas	37
8.1.4 Densidad y Contenido de humedad.....	38
8.1.5 Calidad de encolado.....	39
8.1.5.1 Delaminación	39
8.1.5.2 Esfuerzo cortante	40
8.1.6 Flexión estática para determinación del MOE y MOR.....	41
8.2 Vigas laminadas y Encoladas	43
8.2.1 Métodos no Destructivos para determinación del MOE	43
8.2.2 Flexión estática para la determinación del MOE y el MOR.....	44
8.2.3 Evaluación de la calidad de encolado	45
8.2.3.1 Esfuerzo cortante sobre la línea de encolado	45
8.2.3.2 Ensayos de delaminación.....	47
8.2.4 Contenido de humedad y Densidad.....	48

8.2.5 Flexión uniones finger joint.....	48
9. RESULTADOS.....	49
9.1 Resultados de los ensayos no destructivos y destructivos realizados en árboles en pie, en trozas basales, tablas verdes y tablas secas	49
9.2 Resultados Tablas ensayadas en Máquina Universal utilizando madera de ambas trozas de cada árbol.	54
9.3 Rendimiento Aserrado	55
9.4 Rendimiento Debobinado	57
9.5. Resultados de Madera microlaminada (LVL).....	58
9.5.1 Densidad y contenido de humedad	58
9.5.2 Flexión estática (MOE y MOR) en 4 puntos de Vigas de LVL (54 x 100 x 2400mm).....	58
9.5.3 Flexión estática (MOE y MOR) pequeñas probetas	60
9.5.4 Calidad de encolado.....	61
9.5.4.1 Delaminación	62
9.5.4.2 Esfuerzo cortante	62
9.6 Resultados de Vigas laminadas (GLULAM)	63
9.6.1 Densidad y contenido de humedad	63
9.6.2 Módulo de Elasticidad (MOE) y Módulo de Rotura (MOR)	64
9.6.2.1 Estimación del MOE por métodos no destructivos.....	64
9.6.2.2 Flexión estática (MOE y MOR) ensayo en Máquina Universal.....	65
9.6.3 Flexión estática (MOE y MOR) en 4 puntos de probetas con uniones Finger Joint.....	70
9.6.4 Calidad de encolado.....	70
9.6.4.1 Delaminación	70
9.6.4.2 Esfuerzo cortante	72
9.7 Comparativo ente Productos de Ingeniería de la Madera y Madera sólida, mediante los resultados obtenidos de Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura.....	72
10. Conclusiones.....	77
11. Bibliografía.....	79

Summary

This project was intended to give an additional value to small diameter logs from thinning trees. In Uruguayan forestry usually three commercial thinnings are carried out before harvesting.

For this purpose engineering wood products such as Glued Laminated Lumber (GLULAM) and Laminated Veneer Lumber (LVL) were manufactured and evaluated for structural construction uses. The species selected were *Eucalyptus grandis* and *Pinus taeda*. For the present work logs from trees of the third thinning of both species were evaluated. Diameter breast height (DBH) class obtained was 25-35 cm.

The following schedule was carried out:

- (1) Evaluation of modulus of elasticity in standing trees and logs by non destructive methods
- (2) Mechanical grading of logs and dimension lumber (beam and board) for construction uses
- (3) Manufacture of Engineered Wood Products (GLULAM and LVL) using small diameter logs from both national woods. The objective was to produce large structural members.
- (4) Quality evaluation of sawn boards and Engineered Wood Products

After reviewing the results one of the main conclusions is that engineering wood products can be manufactured from logs of commercial thinning. The product manufactured from these resources has high value and structural use.

Another important conclusion is a decrease of variability between specimens in the properties studied in engineering wood products compared with solid wood. This happen especially in LVL, which allows a more predictable behavior of the product.

Keywords: non-destructive, wood engineering, thinning, *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis*, glulam, LVL.

Resumen

El presente trabajo se enmarcó dentro del programa PDT en el proyecto "Evaluación no destructiva de la calidad de trozas de raleos de árboles de pequeño diámetro y su utilización en productos de ingeniería de la madera de valor agregado " convocatoria N° 35 Subprograma II, proyectos de investigación científica y/o desarrollo tecnológico en el área de "Agroindustria no alimentaría".

El objetivo principal fue estudiar la posibilidad de dar valor agregado a las trozas provenientes de raleos de árboles de pequeño diámetro y su utilización en productos de ingeniería de la madera, en este caso Vigas laminadas y encoladas (GLULAM) y Madera microlaminada (LVL).

Las dos especies seleccionadas fueron *Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda* y se realizaron 2 muestreos por especie, uno en la zona norte y otro en el litoral del país.

Se estudió el Módulo de Elasticidad en árboles en pie y en trozas mediante métodos no destructivos. Se realizó la Clasificación mecánica de trozas y madera dimensionada (vigas y tablas) para uso en la construcción.

Se estudió la utilización de maderas nacionales de pequeños diámetros en grandes miembros estructurales para la construcción a través de la fabricación de GLULAM y LVL para ambas especies seleccionadas.

Se evaluó la calidad de madera aserrada mediante ensayos físico – mecánicos y la de los productos de ingeniería de la madera mediante ensayos físico – mecánicos y de calidad de encolado.

Luego de analizar los resultados se puede decir que una de las principales conclusiones es que los productos de Ingeniería de la madera permiten un mejor aprovechamiento del recurso valorizando los raleos comerciales ya que se pueden fabricar productos con mayor valor agregado y para uso estructural especialmente en *Eucalyptus grandis*.

Otra conclusión importante es que existe una disminución de la variabilidad entre piezas en las propiedades estudiadas en los productos de ingeniería de la madera, especialmente en LVL, lo que permite tener un comportamiento más predecible del producto comparado con la madera sólida.

Palabras claves: no destructivo, ingeniería de la madera, madera de raleos, *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis*, GLULAM, LVL.

1. Introducción

Desde mediados de la década de los años ochenta se han plantado en Uruguay más de 850.000 has. de árboles de especies de rápido crecimiento, principalmente de Eucaliptos y Pinos. Estas plantaciones están llegando sucesivamente al turno final de corte, en un gran porcentaje para su utilización como madera de aserrío. El Uruguay espera su transformación y exportación para contribuir al desarrollo de la economía, valorizando la madera, la creación de nuevos puestos de trabajo, creando desarrollos locales, mayor inclusión de la madera en la construcción de viviendas y contribuir en la creación de una cultura en el uso de la madera. Las trozas provenientes del tercer raleo tienen diámetros de 25 a 35 cm (DAP) y por lo tanto tienen un volumen considerable. Sin embargo, las trozas de pequeño diámetro provenientes de estos raleos han sido consideradas de bajo valor y madera con uso menor, debido seguramente a la falta de investigación sobre la calidad y su mejoramiento en productos forestales como productos de ingeniería de la madera (LVL, SSL, Glulam, etc.)

Internacionalmente se han dado propuestas como " Creando soluciones para el uso de pequeños árboles" que es el título de una conferencia de la Sociedad de Productores Forestales de EEUU, mayo 2004. Este concepto es coincidente con la plantación en sí misma, que es capaz de contribuir a mantener el desarrollo de los productos forestales de bosques sustentables y del planeta en su globalidad. La utilización de los recursos madereros debe ser ambientalmente amigable, estando acorde al concepto de Investigación de Iniciativas de Emisión Cero (o menor emisión) (ZERI). Por otra parte en Uruguay, las trozas provenientes de raleos de árboles de pequeños diámetros no se han utilizado efectivamente.

Teniendo en cuenta lo anterior y al detectar inquietudes y necesidades del sector forestal, tanto de los productores como de los industriales, en cuanto al aprovechamiento y valorización de los primeros raleos comerciales de las especies de rápido crecimiento y en especial de aquellas cuyo destino final es el de madera aserrada. Fue que en marzo del año 2004 los investigadores y técnicos del Departamento de Proyectos Forestales del LATU presentaron ante el Programa de Desarrollo Tecnológico – PDT del Ministerio de Educación y Cultura, el proyecto " Evaluación no destructiva de la calidad de trozas provenientes de raleos de árboles de pequeño diámetro y su utilización en productos de ingeniería de la madera de valor agregado", proyecto S/C/OP/35/08, que fue aprobado por el Comité del PDT en el mes de noviembre del año 2004.

Las actividades del proyecto comenzaron el en setiembre del año 2005 con el primer muestreo de *Eucalyptus grandis* Maiden del norte, específicamente del departamento de Rivera.

2. Descripción de los materiales utilizados

Se trabajó sobre la base de cuatro muestreos, dos de *Pinus taeda* L. y dos de *Eucalyptus grandis* Maiden. Fueron elegidas estas dos especies, por ser las que a la fecha representaban las mayores áreas forestadas con destino a la producción de madera aserrada.

Tabla N° 1: Muestreos, especies, cantidad de árboles y sitios seleccionados.

Especie	Muestreo inicial	Selección final	Edad	Muestreo N°
E. grandis	50 árboles Norte	30 árboles a ensayar	9 años	1
	50 árboles Litoral	30 árboles a ensayar	9 años	2
P. taeda	50 árboles Norte	30 árboles a ensayar	12 años	3
	50 árboles Litoral	30 árboles a ensayar	12 años	4

El primer muestro (M1) fue el de *Eucalyptus grandis* Maiden del norte, del Departamento de Rivera y fue suministrado por la Compañía Forestal Uruguaya S.A.. El segundo muestreo (M2) de *Eucalyptus grandis* Maiden, fue realizado en el litoral y suministrado por la Caja de Jubilaciones y Pensiones Bancarias, Centro Forestal Piedras Coloradas.

El primer muestreo de *Pinus taeda* L. (M3) se realizó en el norte, en el Departamento de Tacuarembó y fue suministrado por la empresa Delmonte S.A.. El segundo muestreo de *Pinus taeda* L. se realizó en el litoral (M4) y fue suministrado también por la Caja de Jubilaciones y Pensiones Bancarias, Centros Forestales.

Tabla N° 2: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 50 árboles de *Eucalyptus grandis* seleccionados (muestreo inicial).

	E. grandis (M1)		E. grandis (M2)	
	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)
Promedio	29,6	1,014	27,5	0,954
Desv. Std	3,1	0,075	2,8	0,077
Máx	37,1	1,133	34	1,088
Mín	24	0,760	21,7	0,764

Tabla N° 3: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 50 árboles de *Pinus taeda* seleccionados (muestreo inicial).

	P. taeda (M3)		P. taeda (M4)	
	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)
Promedio	29,3	0,975	27,2	0,949
Desv. Std	2,8	0,055	2,5	0,052
Máx	35,7	1,058	34,5	1,025
Mín	23,3	0,820	22,7	0,846

Tabla N° 4: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 20 árboles de *Eucalyptus grandis* seleccionados para aserrado.

	E. grandis (M1)		E. grandis (M2)	
	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)
Promedio	29,3	1,030	28,6	0,962
Desv. Std	2,7	0,073	2,1	0,073
Máx	34,3	1,133	32,9	1,088
Mín	25,2	0,801	26	0,774

Tabla N° 5: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 20 árboles de *Pinus taeda* seleccionados para aserrado.

	P. taeda (M3)		P. taeda (M4)	
	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)
Promedio	29,3	0,983	28,2	0,951
Desv. Std	1,2	0,046	2,4	0,046
Máx	31,1	1,034	34,5	1,025
Mín	27,4	0,882	24,5	0,846

Tabla N° 6: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 10 árboles de *Eucalyptus grandis* seleccionados para el debobinado.

	E. grandis (M1)		E. grandis (M2)	
	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)
Promedio	31,1	1,002	30,4	0,991
Desv. Std	3,9	0,099	1,9	0,050
Máx	37,1	1,075	34	1,049
Mín	26,4	0,760	28,2	0,903

Tabla N° 7: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 10 árboles de *Pinus taeda* seleccionados para el debobinado.

	P. taeda (M3)		P. taeda (M4)	
	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)	DAP (cm)	Densidad Apa. Verde (g/cm ³)
Promedio	33,1	0,967	29,7	0,935
Desv. Std	1,5	0,073	1,0	0,054
Máx	35,7	1,058	31,2	1,020
Mín	31,2	0,858	27,5	0,852

Nota: Cuando mencionamos la Densidad Aparente Verde nos referimos al cociente entre la masa y el volumen determinados en madera verde (Glosario general de maderas UNIT 233:2008, numeral 2.3.2.17)

3. Métodos utilizados para Madera Sólida

3.1 Ensayos destructivos y no destructivos realizados

Para la determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR), en vigas de madera sólida, en vigas de glulam y LVL, se realizó el ensayo de flexión estática en cuatro puntos, en máquina universal marca Minebea con una celda de carga de 250 kN de capacidad.

Para la estimación del Módulo de Elasticidad (MOE) mediante métodos no destructivos, en árboles en pie, trozas verdes, vigas de madera sólida, vigas de GLULAM y LVL se utilizaron tres equipos (ver PÉREZ FAVARO, A.; DE CASTRO, R.; OHTA, S./ Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos Informe de Investigación N° 1 Proyecto JICA – LATU, 2000):

- El FFT ANALYZER es un equipo para la estimación del módulo de elasticidad, es un analizador de sonido conectado a un micrófono, donde se determina la frecuencia principal de vibración (en este proyecto longitudinal), la cual es inducida por el golpe de un martillo, sobre el extremo opuesto al micrófono en la pieza de madera, Este equipo es de origen japonés, fabricado por la empresa AND Company, Limited.
- El FAKOPP es equipo para la estimación del módulo de elasticidad, que mide el tiempo de propagación de una onda inducida por un impacto, en recorrer la distancia entre dos transductores. El nombre FAKOPP proviene de la combinación de dos palabras Húngaras: “fa “kopp” que significan árbol y golpear. Es un equipo de origen húngaro, fabricado por la empresa ALNUS Bt.
- El SYLVATEST es un equipo que permite a través del ultrasonido estimar el módulo de elasticidad, sirve para al igual que los equipos anteriores para la clasificación de la madera según sus propiedades físicas y mecánicas, Es de origen Suizo y fue desarrollado por IBOIS

(Instituto Federal de Tecnología de Suiza). El proceso de ultrasonido esta basado la relación física, entre la velocidad de propagación de una onda de ultrasonido en la madera y las propiedades mecánicas de la madera.

Para la estimación del módulo de elasticidad es necesario conocer la densidad en el momento del ensayo (peso / volumen, ambos en condición de contenido de humedad de ensayo), para lo cual a cada viga se le determino el peso, largo, ancho y altura.

3.2 Ensayos en el monte en árboles en pie

De cada muestreo se seleccionaron 50 árboles dentro del rodal, buscando que fuesen representativos de los árboles existentes en el rodal. A estos se les midió el diámetro a la altura del pecho (DAP), se les estimo el módulo de elasticidad (del árbol en pie) mediante dos equipos no destructivos, también se les extrajo un tarugo de 12 mm de diámetro (mediante calador a motor "Tanaka" desarrollado por CSIRO de Australia) para determinar la densidad. Basándose en estos parámetros se eligieron y marcaron 30 árboles.

- Medida la longitud total.
- Medida de la altura de la primera rama viva.
- Medida de la altura hasta 20 cm de diámetro (altura comercial).
- Medición del diámetro a la altura de pecho (DAP).
- Estimación del Módulo de elasticidad (MOE) de árbol en pie, mediante equipos FAKOPP y SYLVATEST.
- Determinación de la densidad aparente básica mediante tarugos de 12 mm (Calador TANAKA).
- Determinación de la resistencia a la penetración mediante el equipo PILODYN.
- Procesamiento de los datos para la elección de los árboles a muestrear.

3.3 Ensayos en el monte de 30 árboles apeados y de 60 trozas

De cada muestreo con posterioridad a ser apeados los árboles fueron trozados y se extrajeron de cada árbol dos trozas de 3,0 m (2,60 m de longitud final) estas fueron separadas en dos grupos, 10 árboles 20 trozas (10 primeras

y 10 segundas trozas) para debobinar y 20 árboles 40 trozas (20 primeras y 20 segundas). Se realizaron ensayos no destructivos en los árboles en pie, se estimó el módulo de elasticidad (MOE), mediante los equipos FAKOPP y SYLVATEST,

- Medición de los árboles (longitud, altura primera rama viva, longitud hasta altura comercial).
- Marcado e identificación de las 40 trozas (trazabilidad para ensayos mecánicos en trozas verdes, madera sólida y en madera laminada y encolada (glulam).
- Marcado e identificación de las 20 trozas a debobinar (trazabilidad para fabricación de tableros de LVL).
- Extracción rodajas (Top end) para densidad aparente básica de las trozas a debobinar.
- Estimación del Módulo de elasticidad de trozas a debobinar, equipos FAKOPP y SYLVATEST.
- Colocación de conectores de chapa (gang nail) a 20 trozas (*E. grandis*) para debobinar en URUPANEL.



Figura N° 1. Ensayos no destructivos para estimar el MOE en árboles, *Eucalyptus grandis* en pie, equipos FAKOPP y SYLVATEST.



Figura N° 2. Ensayo no destructivo para estimar la densidad aparente en árboles, *E. grandis* en pie, extracción de tarugo 12 mm de diámetro con extractor a nafta.

3.4 Ensayos no destructivos en 40 trozas verdes destinadas al aserrado

Una vez transportadas las 40 trozas destinadas al aserrado y ensayo de madera sólida y productos de ingeniería como el GLULAM se les realizaron los siguientes ensayos.

- Determinación de la densidad aparente básica, extracción de rodajas en punta fina (top end).
- Estimación del Módulo de elasticidad de trozas mediante equipos FAKOPP y SYLVATEST.
- Estimación de módulo de elasticidad de trozas mediante equipo FFT ANALYZER.
- Clasificación visual de las trozas.



Figura N° 3. Ensayos no destructivos para estimar el MOE en trozas de *P. taeda*, en el monte (FAKOPP) y en el LATU antes del aserrado (FAKOPP, FF ANALYZER).

3.5 Aserrado de las trozas y secado de las tablas

Se procedió en el aserradero del LATU al aserrado de las trozas para la obtención de tablas, representativas del radio de las trozas, para ser evaluadas en ensayos mecánicos en máquina universal y fabricación de vigas laminadas y encoladas (glulam) con uniones dentadas (finger joint). Las dimensiones de las tablas aserradas fueron 33 x 120 x 3990 mm.

De las trozas de *E. grandis* se obtuvieron tablas, que fueron identificadas según su ubicación en el radio como (Figura N° 4):

- Tablas "BA" las que se extrajeron contiguas a la médula, constituida por madera juvenil
- Tablas "B" que son tablas distantes a la médula con alto porcentaje de madera juvenil, dada la edad de los árboles
- Tablas "C" que son próximas a la corteza con una mayor proporción de madera adulta.

De las trozas de *P. Taeda* se obtuvieron tablas "B" y "C" de las mismas ubicaciones en el radio que en *E. grandis*, con la diferencia entre ambos de que si se obtuvieron tablas que incluyeran médula y se les denominó tablas "A" (Figura N°4):

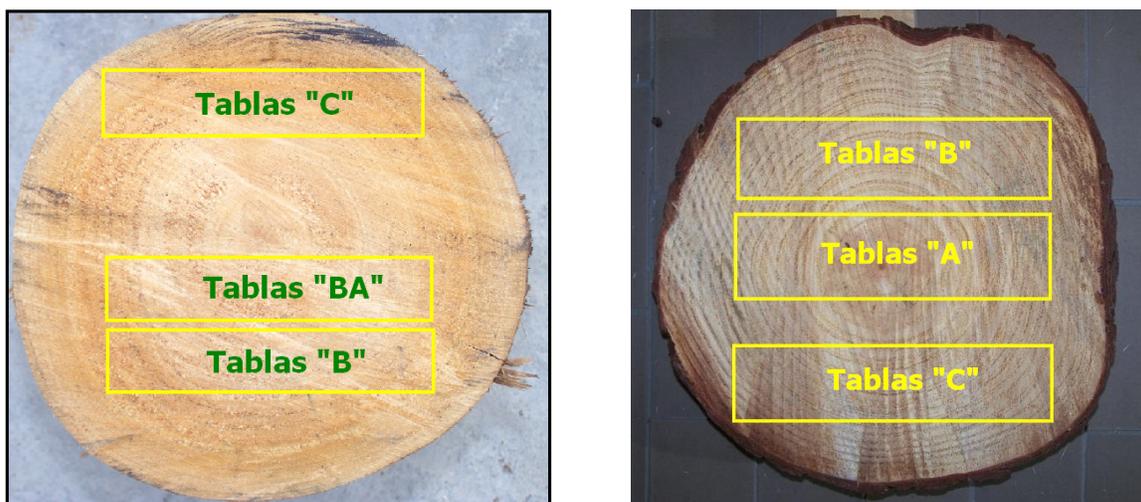


Figura N° 4. Esquema de obtención de tablas de *E. grandis* y *P. taeda* según su ubicación en el radio.

En la Figura N° 5 se pueden ver las operaciones de aserrado de trozas de *P. taeda* y *E. grandis* en el aserradero del LATU.



Figura N° 5. Aserrado de trozas de *P. taeda* y *E. grandis*.

A su vez en la Figura N° 6 se puede ver las operaciones de secado de vigas de ambas especies para ensayos mecánicos y fabricación de GLULAM en el horno de secado del LATU.



Figura N° 6. Secado de vigas para ensayos mecánicos y fabricación de GLULAM, de *P. taeda* y *E. Grandis*.

3.6 Ensayos no destructivos en tablas verdes

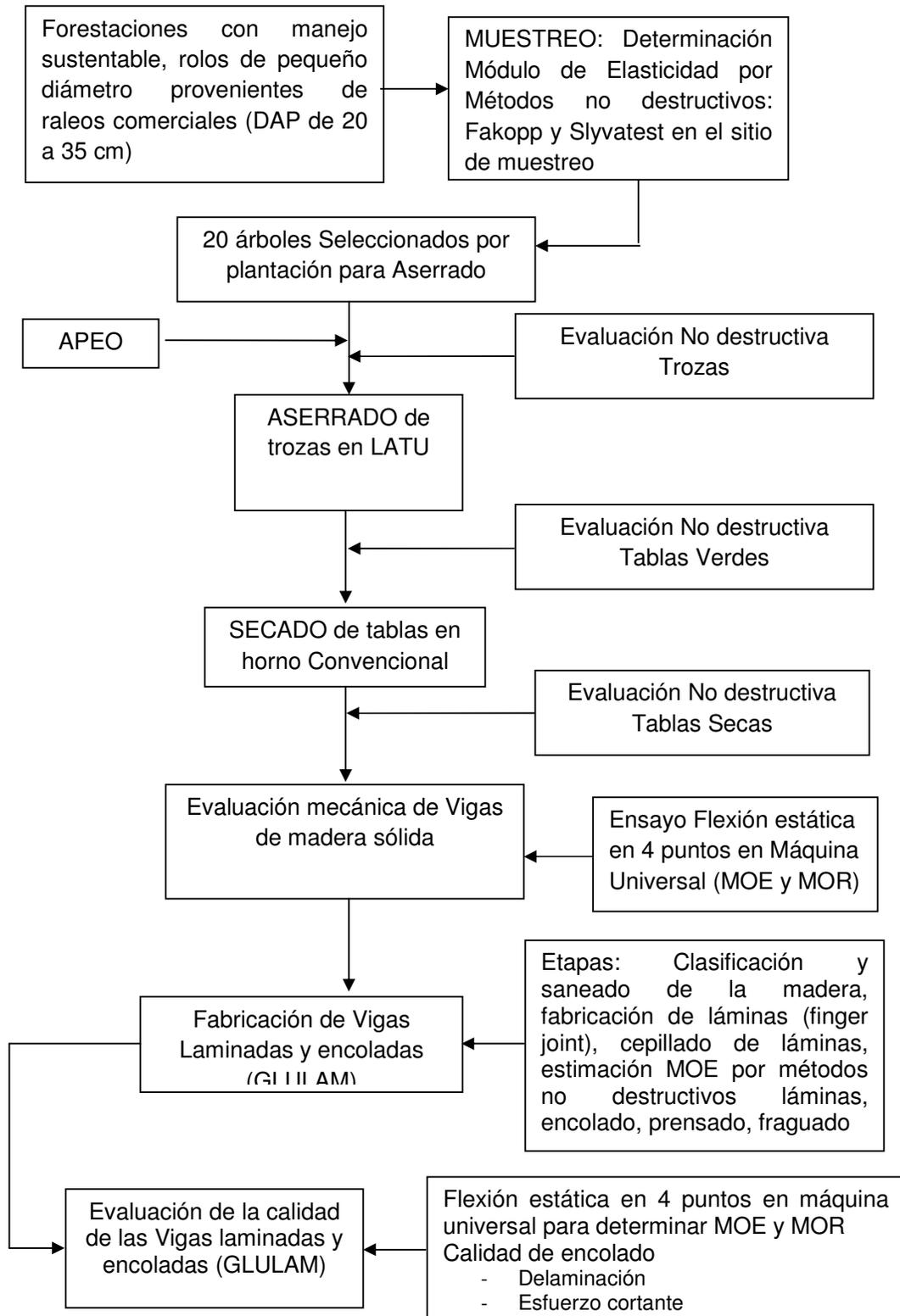
Antes de proceder al secado de las tablas en horno convencional de secado, se les estimó el módulo de elasticidad mediante métodos no destructivos.

- Estimación de módulo de elasticidad mediante equipo FFT ANALYZER.
- Estimación del Módulo de elasticidad mediante equipo FAKOPP.
- Estimación del Módulo de elasticidad mediante equipo SYLVATEST.

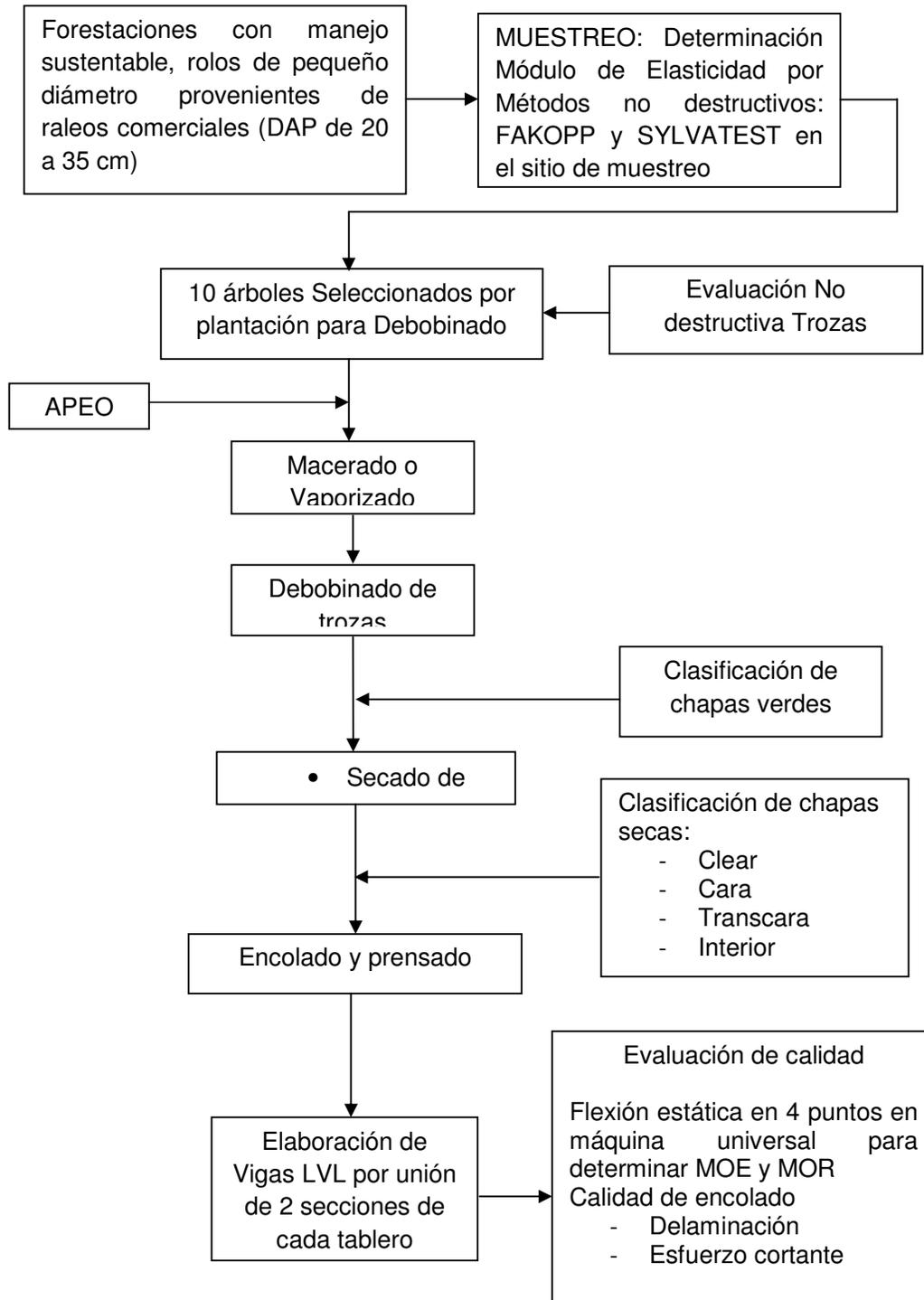
3.7 Ensayos destructivos y no destructivos en tablas secas

- Estimación de módulo de elasticidad mediante equipo FFT ANALYZER.
- Estimación del Módulo de elasticidad mediante equipo FAKOPP.
- Estimación del Módulo de elasticidad mediante equipo SYLVATEST.
- Determinación del módulo de elasticidad en flexión estática en máquina universal.
- Determinación del módulo de rotura en flexión estática en máquina universal.

4. Diagrama de ejecución de la Fabricación y Evaluación de Calidad de Vigas laminadas



5. Diagrama de ejecución de la Fabricación y Evaluación de Madera microlaminada (LVL)



6. Materiales y métodos para Vigas las Laminadas y Encoladas

6.1 Definición Vigas laminadas

La madera laminada encolada se define como todo elemento estructural formado por la unión de piezas de madera y un adhesivo, con sus fibras prácticamente orientadas de forma paralela. Atendiendo a la forma de realizar el laminado se distinguen dos tipos: madera laminada horizontal, en la cual los planos de encolado son perpendiculares a la dimensión mayor de la sección transversal, y la madera laminada vertical, en la cual los planos de encolado son perpendiculares a la dimensión menor de la sección transversal. (La madera y su tecnología, Madrid, España, 2002). En la figura N° 7 se observan el tipo de vigas elaboradas en el proyecto.



Figura N° 7. Vigas de *E. grandis* y *P. taeda* elaboradas en el Proyecto.

6.2 Breve reseña histórica

El carpintero alemán Karl-Friedrich-Otto Hetzer, propone primero en Alemania y Francia en 1906, y posteriormente en Suiza en 1907, gracias a los progresos de la industria química de las colas, un método para la fabricación de madera laminada utilizando la caseína para el encolado de las láminas, sustituyendo así bridas, pernos y clavos. Este hecho supone la concepción del nacimiento actual de la madera laminada encolada.

Los primeros ensayos con madera laminada encolada se realizaron en Suiza entre 1910 y 1915, alcanzándose un desarrollo importante en Holanda en 1921, incorporándose a este sistema constructivo a los americanos en la década del 30, siempre bajo la influencia directa o indirecta de Otto Hetzer.

La aparición de las colas de urea en 1930 y de resorcina en 1940 supuso el lanzamiento definitivo de la madera laminada, ya que hasta entonces su uso quedaba limitado a interiores.

6.3 Ventajas y desventajas de la madera laminada

6.3.1 Ventajas

- Se pueden fabricar elementos estructurales de mayor tamaño, que el de las dimensiones que permitirían la madera sólida de árboles de similares diámetros.
- Se fabrican piezas libres de defectos.
- Permite la utilización de trozas de pequeños diámetros como las que provienen de raleos comerciales.
- Adecuada utilización de maderas de diferentes calidades, ya que se puede utilizar madera de baja resistencia en zonas donde el esfuerzo no será importante (zona central) y madera más resistente en las zonas externas que es donde se producen los mayores esfuerzos.
- No sufre alteraciones ante la presencia de agentes químicos por lo que una vez finalizado el proceso de fabricación se pueden aplicar insecticidas, fungicidas e hidrófugos como prevención ante agresiones externas.
- Excepcional resistencia al fuego ya que al poseer grandes dimensiones en la sección transversal la hacen más resistente al fuego que construcciones de acero, diseñadas para soportar la misma carga. Las construcciones con vigas laminadas se queman más lentamente, tiene mayor resistencia a la penetración del calor, en relación con la del acero, donde este colapsa. Esto se debe a que el avance de la combustión es muy lento de alrededor de 0,6 mm por minuto.
- Mediante el curvado de la madera durante el proceso de fabricación, una variedad de formas arquitectónicas se pueden obtener que serían muy difíciles o imposibles de obtener con otros materiales.
- Buenas propiedades aislantes tanto acústicas, térmicas, eléctricas y magnéticas.
- Se pueden fabricar vigas con grandes luces que pueden superar los 100 metros sin apoyos intermedios, siendo muy resistentes y livianas a la vez.

- Excelentes propiedades físico-mecánicas como elevada resistencia a la flexión, excelente elasticidad, muy buena estabilidad dimensional. Esto permite absorber choques o golpes, resistir cargas repetidas sin presentar fatiga.
- Facilidad de montaje en obra ya que son elementos prefabricados a la medida y también son más livianas frente a otros materiales.
- Al secarse las láminas en forma individual se acelera el proceso de secado en horno, comparado con el de una viga de madera sólida de la misma sección.

6.3.2 Desventajas

- A menudo son muy pesadas para el uso que se les va a dar.
- Elementos de gran longitud y curvatura son difíciles de manipular y transportar lo que va a incidir en el precio final.
- Tiene mayor costo que la madera maciza ya que hay que utilizar adhesivos, mano de obra especializada y en el proceso de fabricación hay un elevado factor de pérdida de madera cercano al 30 – 50 %.

6.4 Usos

Lo importante aparte de buscar valor agregado en un elemento laminado es producir un elemento constructivo con elevada resistencia.

Los principales usos de la madera laminada encolada son los siguientes:

- Vigas
- Columnas
- Arcos
- Pórticos
- Cerchas

Con la utilización de madera impregnada y un adhesivo para el exterior las vigas de madera laminada y encolada son elementos muy utilizados hoy en día, para barbacoas, pérgolas, decks, puentes carreteros, vías ferroviarias, etc.

6.5 Adhesivos utilizados

Al seleccionar un adhesivo hay que tener en cuenta una serie de factores que van a influir en la resistencia de la unión encolada. Entre estos se pueden mencionar los siguientes:

El adhesivo debe ser adecuado a las condiciones ambientales en que se va a utilizar el producto elaborado.

Se debe mantener la temperatura y la humedad relativa del local donde se realice el encolado bajo ciertos límites, ya que por ejemplo temperaturas bajas pueden aumentar la viscosidad del adhesivo dificultando la penetración del mismo en la madera.

El contenido de humedad de las piezas a encolar debe ser el adecuado y deben estar dentro de un rango del orden del 5 al 15 % de C.H. Por fuera de estos valores se obtienen resistencias menores, esto se debe fundamentalmente a que para contenido de humedad bajo se produce una excesiva penetración o absorción del adhesivo en la madera, acortándose además el tiempo abierto de utilización del mismo, mientras que un contenido de humedad alto impide una correcta penetración del adhesivo debido a una saturación de humedad de los poros de la madera.

Las superficies a encolar deben ser paralelas y haber sido cepilladas como máximo 24 horas antes del encolado. Además, las piezas a encolar deben ser libres de defectos.

Se deben respetar los tiempos para el almacenaje y la aplicación del adhesivo, montaje de las piezas, prensado y curado.

La carga del adhesivo debe estar de acuerdo a las recomendaciones del fabricante y ser uniforme en toda la superficie a encolar.

La presión durante el fraguado del adhesivo debe ser uniforme y constante en toda la superficie a encolar.

El contenido no volátil y la durabilidad del adhesivo en el tiempo expuesto a diferentes condiciones son importantes también a la hora de seleccionar un adhesivo.

Los adhesivos seleccionados para la fabricación fueron los siguientes:

Acetato de polivinilo (PVA) para las uniones finger joint, es un adhesivo líquido de naturaleza termo plástica pronto para uso, de color blanco a amarillo, de aplicación directa, prensado a temperatura ambiente. Alta resistencia en condiciones secas y baja resistencia en condiciones de alta humedad y temperatura.

Emulsión de Polímeros de ISOCIANATO (EPI) (SYNTEKO 1984 – ENDURECEDOR 1993) utilizado para fabricar vigas de pino y eucaliptos. Los adhesivos tipo EPI son colas de dos componentes. Dichos sistemas están compuestos por una dispersión base de adhesivo (Estireno Butadieno) soluble en agua, con un isocianato como catalizador. La proporción de la mezcla es de 100 partes por peso de adhesivo y 14 partes por peso de catalizador.

Resina a base de RESORCINOL-FORMOL (CASCOPHEN RS-216-M) solamente utilizado para vigas de eucaliptos. Dicho adhesivo es una resina sintética en solución alcohol / agua y debe ser usada con un endurecedor

especialmente formulado. La proporción de la mezcla es de 100 partes por peso de adhesivo y 20 partes por peso de catalizador.

6.6 Madera utilizada para fabricar las vigas laminadas y encoladas

La madera utilizada para la fabricación de las vigas laminadas fueron tablas de cada muestreo de *E. grandis* y *P. taeda*. También se reutilizaron las tablas ensayadas en máquina universal de cada muestreo aprovechando las partes de las mismas que estuvieran sanas.

Tanto para *E. grandis* como *P. taeda* las láminas o blanks (con uniones finger joint) se fabricaron en la industria.

Para los muestreos de *E. grandis* se elaboraron las vigas laminadas encoladas con ISOCIANATO en la industria, confeccionándose 6 vigas de cada muestreo.

En el laboratorio del LATU se confeccionaron 6 vigas de cada muestreo utilizando RESORCINOL. También se confeccionaron las vigas de *P. taeda* utilizando como adhesivo ISOCIANATO, confeccionándose 8 vigas de láminas sin nudos de cada muestreo.

6.7 Proceso de Fabricación

6.7.1 Clasificación y saneado

La clasificación de las tablas fue llevada a cabo en el laboratorio del LATU, realizándose una inspección visual, observándose las caras, cantos y cabezas de las mismas. El objetivo es determinar defectos que puedan tener las tablas y poder realizar el saneado de las mismas.

El saneado es la eliminación de defectos de la madera como nudos, rajaduras o presencia de médula. Para realizar esta operación se traza con un marcador los intervalos considerados a excluir ya que presentan los defectos antes mencionados. En la industria se utilizó una sierra de discos provista de un lector óptico, posiciona la madera sobre los trazos marcados, eliminando los defectos incluidos. En el laboratorio esta operación se realizó utilizando una sierra despuntadora de disco.

Esta eliminación mejora la calidad estructural de la madera, debiendo reconstituirse las piezas mediante el uso de uniones dentadas (finger joint). Las piezas obtenidas poseen un largo de más de 50 cm como las que se muestran en la Figura N° 8.



Figura N° 8. Piezas para elaboración de Vigas Laminadas.

Las piezas fueron identificadas con el número de muestreo y se procedió a embalarlas con film de polietileno para poder transportarlas a las industrias para realizar las uniones dentadas.

6.7.2 Fabricación de las láminas

La realización de uniones dentadas permite construir láminas de gran longitud con garantías adecuadas de resistencia y seguridad. En el caso del proyecto se utilizaron uniones longitudinales dentadas (finger joint).



Figura N° 9. Perfiles Finger joint saliendo de la Fresadora.

La máquina utilizada es una fresadora que tiene un cabezal que gira a alta velocidad contra la madera produciendo el perfil dentado. La misma máquina tiene una encoladora que esparce adhesivo a través del perfil como se muestra en la Figura N° 9.

Cuando salen de la máquina como se muestra en la Figura N° 10 se producen las uniones de forma manual. Luego se procede al aplicar presión en forma mecánica. La presión se aplica de forma rápida, formándose láminas del largo que uno desee. Estas láminas posteriormente son transportadas a una zona de fraguado para luego proceder al cepillado de las mismas.



Figura N° 10. Elaboración de las láminas en la industria.

El número de dientes que posea la unión dentada, el ángulo y la profundidad de los dientes de los mismos son factores importantes para dar mayor resistencia. En el caso del proyecto las piezas tienen un ancho de 100 mm tienen 25 dientes con una altura de 10 mm, un ancho de 4 mm. El adhesivo utilizado en ambas especies fue PVA que poseen una polimerización rápida lo que permite un manejo rápido de las piezas.

6.7.3 Cepillado de las láminas

Lo que se busca en esta etapa es eliminar irregularidades, exceso de adhesivo y preparar las superficies de las láminas para el encolado. Con el cepillado se lleva a las láminas al espesor definitivo realizándose por lo general 24 horas antes del encolado. De esta manera se prepara la superficie para que el adhesivo se esparza, penetre adecuadamente y así produzca una unión resistente.

Las láminas pasan a través del cepillo, donde se cepillan ambas caras. Una vez que salen las mismas son identificadas con un número correlativo de lámina y con el muestreo al que corresponden.

6.7.4 Armado en seco

Una vez finalizado el cepillado se procedió a la determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) de las láminas de forma de clasificar las mismas. Esta determinación se realizó a través de métodos no destructivos. Los métodos utilizados fueron los siguientes:

- FFT ANALYZER
- FAKOPP
- SYLVATEST
- Flexión estática con pesas

Los tres primeros métodos ya fueron descriptos anteriormente y la flexión estática por pesas consiste en ir aplicando pesas de peso conocido sobre las láminas en el intervalo elástico e ir midiendo las deformaciones que se producen utilizando comparador digital o transductor, ver Figura N° 11. Se utilizaron 3 pesas de 5 kilos cada una, y se midió la deformación a los 5 kilos, a los 10 kilos y a los 15 kilos de carga.



Figura N° 11. Flexión estática por pesas en láminas finger joint.

El MOE por pesas se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{MOE} = (\Delta P * s^3) / (4 * \Delta y * b * h^3)$$

Donde:

ΔP = carga de las pesas

s = distancia entre los apoyos de la lámina

Δy = deformación para ΔP

b = ancho

h = altura

También de a cada lámina se le determinó el peso y las dimensiones para poder determinar la densidad. Se realizó una inspección visual de manera de eliminar las láminas con defectos como diferencias de espesor en el largo.

Se realizaron los cálculos de los resultados del ensayo de flexión por pesas y se clasificaron las láminas en 3 categorías de MOE. Las de MOE mayor son las láminas que se utilizan en la parte exterior de las vigas y las de valor bajo en la zona central.

Con los datos se procedió al ensamblado en seco de las vigas con el objetivo de ordenar, orientar y revisar las láminas, teniendo en cuenta evitar superposición de uniones dentadas en la sección de la viga.

Cada viga posee 5 láminas, 2 de MOE alto, 2 de MOE intermedio y una de MOE bajo en el centro como se muestra en el esquema de la Figura N° 12.



Figura N° 12. Esquema de diseño de la ubicación de las láminas que van a formar la viga según MOE.

6.7.5 Encolado

La etapa de encolado se inicia con la preparación del adhesivo comprendiendo todas las operaciones para dejar al adhesivo en condiciones para su empleo. Para esto hay que seguir las especificaciones técnicas del fabricante para ir mezclando los diferentes componentes del mismo.

En la industria se utilizó un mezclador eléctrico alrededor de medio minuto, mientras que en el laboratorio esta operación se realizó manualmente.

por más de 2 minutos de forma de lograr una mezcla homogénea de los componentes.

Para la Emulsión de Polímeros de ISOCIANATO (EPI) la relación de mezcla fue de 100 partes por peso de adhesivo y 14 partes por peso de catalizador mientras que para la Resina a base de RESORCINOL-FORMOL fue de 100 a 20 partes respectivamente.

La vida de trabajo del adhesivo, que es el tiempo que puede transcurrir entre la preparación del adhesivo y su utilización sobre las piezas a unir fue para EPI de 35 minutos a 20°C, mientras que para la Resina Resorcinol - Formol fue de 4 horas aproximadamente, esto implica que hay que ser rápidos a la hora de armar la viga y más aún al usar EPI como adhesivo.

Luego de preparado se pasa a la aplicación del adhesivo sobre las piezas a unir. Esta aplicación debe cubrir toda la superficie de la madera, no sólo en el momento de la aplicación sino hasta el fraguado. Es decir que la película de adhesivo debe ser tal que luego de introducirse en los poros de la madera quede una superficie continua de adhesivo para que se pueda enlazar con la otra pieza de madera a encolar.

Se esparció el adhesivo y para dicha función se utilizó una encoladora mecánica de rodillos para las vigas de E. grandis usando EPI como adhesivo y un rodillo manual para las demás vigas que fueron encoladas en el laboratorio del LATU como se muestra en la Figura N° 13.



Figura N° 13. Encolado de láminas utilizando encoladora mecánica y utilizando rodillo manual.

El encolado fue realizado en una sola cara de la lámina y la dosificación de adhesivo fue de aproximadamente 200 – 250 g/m². La cantidad de adhesivo depositado sobre cada pieza fue determinado por diferencia de peso antes y

luego de la aplicación del mismo y con el área de cada pieza se obtuvo cuantos g/m² se aplicaron realmente.

A medida que se van encolando las láminas se va armando la viga y una vez que está armada se pasa a la fase de prensado. Esta operación se debía realizar lo más rápidamente posible debido a que hay que evitar que el adhesivo fragüe antes de realizar el prensado.

Este período de tiempo se conoce como tiempo de reunión y se divide en tiempo de ensamblaje abierto (superficies expuestas, tiempo entre el esparcido y la unión con los adherentes) y tiempo de ensamblaje cerrado (superficies juntas, tiempo entre unión de los adherentes y la aplicación de las condiciones de fraguado).

Para las vigas encoladas con EPI este tiempo es de 5 minutos en tiempo abierto y 15 minutos el tiempo cerrado a 20 °C y para las vigas encoladas con la Resina a base de Resorcinol-Formol es de 15 y 60 minutos respectivamente a la misma temperatura.

6.7.6 Prensado

El prensado tiene como objetivo mantener las piezas encoladas a la presión requerida durante el tiempo de polimerización del adhesivo. El mismo debe ser uniforme y la presión constante durante el tiempo de fraguado del adhesivo. Este tiempo depende de factores como el tipo de adhesivo utilizado o la temperatura y humedad a la que se produce el prensado.

También existen una infinidad de tipos de prensas para producir elementos laminados, en el caso del proyecto se utilizaron una prensa hidráulica de alta frecuencia y prensas manuales ejerciendo presión uniforme al girar tres tornillos.

A nivel Industrial se utilizó una prensa hidráulica de alta frecuencia y prensado horizontal como se muestra en la Figura N° 14. El método de alta frecuencia consiste en que las láminas de madera previamente encoladas son puestas entre los platos de la prensa que están conectados a un generador de alta frecuencia. Lo que se produce es un campo de corriente alterna de alta frecuencia en la línea de encolado donde la energía producida genera calor fraguando el adhesivo.



Figura N° 14. Prensa Hidráulica de alta frecuencia.

Dicha operación tardaba unos pocos minutos y se alcanzaba una presión de 50 kgf/cm^2 . El tiempo de presión fue de alrededor de 10 minutos donde luego de esto salían las vigas de la prensa y eran llevadas al área de maduración por unos 15 días antes de ser trabajadas y evaluadas.

En el laboratorio del LATU el prensado fue de forma manual, donde se utilizaron 9 prensas manuales por viga, con prensado vertical, que eran colocadas a una distancia entre sí de 30 cm. Mediante el uso de un torquímetro se daba presión hasta $10\text{-}12 \text{ kgf/cm}^2$ haciendo girar cada tornillo (tres) que poseen las prensas como se muestra en la Figura N° 15. A su vez se colocaron sargentos en los laterales de forma de evitar movimientos de las vigas durante este proceso y el fraguado posterior.



Figura N° 15. Prensado de Vigas laminadas en LATU.

Luego de unos 15 a 20 minutos se verifica la presión ya que puede disminuir la misma debido a un escurrimiento del adhesivo. Si esto ocurre hay que reapretar llevando las prensas a la presión especificada.

Se elaboraron 2 vigas por día y las mismas se dejaban con las prensas por 24 horas cuidando que la temperatura sea superior a 20° C para garantizando que se produzca un buen fraguado.

Luego las vigas son colocadas en un ambiente donde la temperatura y humedad eran controladas y se dejaban ahí por un lapso de una semana antes de realizar operaciones de terminación. Este tiempo es necesario para que las líneas de cola de las vigas adquieran su máxima resistencia.

Como se muestra en la Figura N° 16 todas las caras de las vigas antes de ser ensayadas eran cepilladas y despuntadas dejándolas de un largo de 2900 mm. Estas operaciones fueron realizadas en las instalaciones del LATU.



Figura N° 16. Cepillado de Vigas en LATU.

El acabado de la viga consiste en el pulido de las superficies para retirar residuos de adhesivo y dar uniformidad.

7. Materiales y métodos para Madera microlaminada (LVL)

7.1 Definición de LVL

La madera microlaminada (LVL) es un tipo de madera de composición estructural (Structural Composite Lumber), término genérico para describir a una familia de productos de ingeniería de la Madera que combinan láminas de madera, listoncillos, viruta o pequeños elementos de madera con un adhesivo de uso estructural para formar productos estructurales similares a una tabla de madera (OSB, SSL, etc.)

Es un producto de gran resistencia que se obtiene encolando gruesas chapas de madera en dirección a la fibra y paralelas entre sí. Dicho producto se puede observar en la Figura N° 17 donde se puede apreciar la dimensión de un tablero de LVL con relación a las trozas de donde provienen las láminas del mismo.

A diferencia del tablero contrachapado, todas las chapas se encuentran dispuestas paralelas a la dirección longitudinal, lo cual le faculta para absorber bien los esfuerzos en dirección transversal como en el caso de alas de vigas, siendo su comportamiento estructural más previsible que el tablero contrachapado para este tipo de aplicaciones.

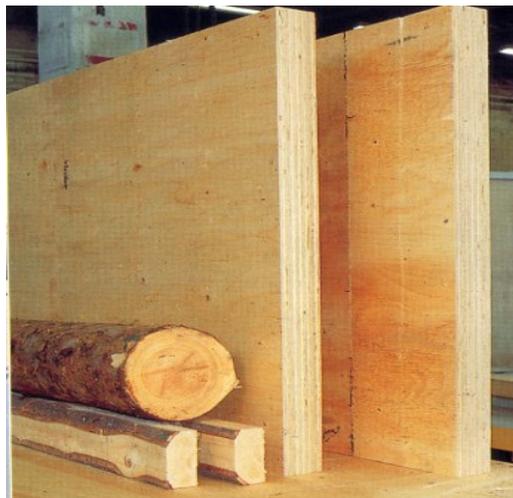


Figura N° 17. Tablero de Madera Microlaminada LVL.

El LVL (Laminated Veneer Lumber) además de poseer mayor precio de venta que la madera contrachapada presenta ventajas frente a ésta y a la madera aserrada en múltiples aplicaciones, especialmente en lo relacionado a su aplicación estructural.

Se produce encolando láminas de aproximadamente 3 mm de espesor (elaboradas mediante el debobinado de rolos) que se colocan de forma que el grano sea paralelo al eje longitudinal de la pieza a producir. Durante el proceso se pueden eliminar los defectos (nudos de grandes dimensiones, grietas etc.) e inclusive ordenar las láminas de acuerdo a su resistencia para optimizar la resistencia final de la pieza.

7.2 Breve Reseña histórica

Las maderas microlaminadas LVL comenzaron a desarrollarse simultáneamente en Europa, EE.UU y Canadá en los años 70. En la actualidad presenta una gran aceptación en la industria de la construcción de los países desarrollados, debido a la escasez de trozas de grandes diámetros, para transformarla en madera aserrada, que presentan algunos mercados. La tecnología de producción de LVL permite la conversión de trozas de pequeño diámetro en vigas de grandes dimensiones, pudiendo utilizarse materia prima que actualmente no era utilizada en la industria de aserrío y contrachapado.

7.3 Ventajas de la Madera Microlaminada

7.3.1 Las ventajas respecto a la madera aserrada:

- Calidad uniforme en toda su extensión, o sea con pequeña variabilidad de características en cada pieza.
- Pequeña variabilidad entre piezas.
- Rectitud.
- Tamaños disponibles (solamente limitados por la posibilidad de transportarlas).
- Facilidad de aplicación de tratamientos o de características estructurales específicas. Las características mencionadas permiten considerar al LVL como un material apto para la realización de estructuras.

7.3.2 Las ventajas respecto a la madera contrachapada:

- No exige longitudes ni diámetros considerables de rolos
- Utiliza un solo espesor de chapas
- Permite un mejor aprovechamiento de maderas de baja calidad y en general de baja resistencia mecánica (Provenientes de raleos o remanentes de fustes de árboles utilizados para elaborar madera aserrada)
- Precio de venta mayor que el de la madera contrachapada en los mercados internacionales

7.4 Usos

El LVL es especialmente apto para la utilización estructural en la construcción, como vigas o pilares entre otros como así también en armazones, andamios, escaleras etc. pero no sustituye a la madera contrachapada para encofrados de hormigón.

7.5 Adhesivo utilizado

El adhesivo que se utilizó fue en base a UREA FOLMALDEHIDO y fue suministrado por la empresa URUPANEL S.A.

7.6 Madera utilizada para fabricar LVL

Luego de apeados los árboles, se obtienen 2 trozas de 3 metros de largo de cada uno. Para la fabricación de los tableros de LVL se apearon 10 árboles de cada muestreo. Luego fueron transportados desde el monte hasta la empresa URUPANEL S.A. que es una empresa dedicada a la fabricación de contrachapados, ubicada en el departamento de Tacuarembó.

Una vez arribadas las trozas a la planta, las mismas son evaluadas a través de métodos no destructivos, donde se estimó el módulo de elasticidad, mediante el equipo FAKOPP, descrito en capítulos anteriores.



Figura N° 18. Extracción de Rodaja para Densidad y determinación del MOE utilizando el FAKOPP.

El ensayo consiste primero en determinar la densidad de la troza, para esto se extrae una rodaja punta fina (top end) de cada troza. Luego se realizó el despunte de cada troza. Esta operación es necesaria para dar el largo definitivo a la troza. En este caso se lleva a la dimensión de 2,6 metros de largo que es la dimensión apropiada para el torno. También el despunte sirve para evitar piedras y arena en las caras de los extremos, así como gang nail o conectores metálicos que se utilizan para evitar grietas en los extremos. Esto se puede observar en la Figura N° 18 en los puntos 1 y 2.

La segunda etapa es clavar los sensores en los extremos de la troza y conectarlos al equipo, observándose en el punto 3 de la figura anterior. Por último se efectúa un golpe en el transductor de inicio. El tiempo de propagación (microsegundos) se lee inmediatamente en la pantalla del equipo.

7.7 Proceso de Fabricación

7.7.1 Macerado o Vaporizado

El objetivo es ablandar o plastificar a la madera saturada de agua para lograr un corte suave, un menor consumo de energía y un desgaste menor de las cuchillas.

Además al trabajar con la madera caliente y saturada en agua se logra mejorar el rendimiento, mejor calidad de la chapa y se obtienen espesores constantes luego del debobinado.

Esta operación se realiza en cámaras que están fabricadas de hormigón y poseen unas dimensiones de 10 a 12 metros de longitud, una altura de 5 a 6 metros y un ancho de 3 metros aproximadamente como se observa en la

Figura N° 19. Poseen un sistema de lonas que cierra la entrada desde el techo. Tienen en su interior un sistema de cañerías por donde sale el vapor de agua.



Figura N° 19. Cámaras de Vaporizado.

Una vez preparadas las trozas son introducidas dentro de las cámaras, utilizando un tractor con grapo. El tratamiento consiste en utilizar vapor para ablandar a la madera. Tiene una duración de aproximadamente 10 horas y la temperatura del vapor de agua es de 60 °C. Al finalizar el vaporizado las trozas están prontas para ser debobinadas.

7.7.2 Debobinado

Esta operación se realiza utilizando un torno automático. Este torno posee 2 puntos motrices provistos de garras, esto permite sujetar a la troza y además girar la misma a alta velocidad durante el debobinado.

Además, posee una cuchilla que es la que produce la chapa en forma de cinta. Las trozas al girar son presionadas contra la larga cuchilla que está fija, produciendo una chapa de espesor definido y de longitud indefinida.

Las trozas se cargan en el alimentador, en el caso del proyecto, primero se cargan las trozas basales y luego las segundas trozas como se muestra en la Figura N° 20. De esta forma al final del proceso se puede determinar el rendimiento de cada tipo de trozas.



Figura N° 20. Alimentador de Trozas.

El operador del torno fija la troza a los puntos motrices, esta operación puede demorar más tiempo que el debobinado en sí (Figura N° 21). Luego comienza a girar la troza contra la cuchilla para dejar a la misma lo más cilíndrica posible. Luego aumenta la velocidad, aproxima nuevamente la troza contra la cuchilla y produce el desenrollado.



Figura N° 21. Torno automático con troza fijada previo al debobinado.

Durante el debobinado se produce una chapa con un espesor de 3,2 mm, un ancho que es igual al largo de la troza, en este caso 2,6 metros, y longitud indefinida, ver Figura N°22.



Figura Nº 22. Chapa obtenida luego del debobinado.

Para estimar la longitud de la chapa se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$l = (\pi (D_i^2 - D_f^2)) / (4 \cdot e)$$

Donde:

D_i = es el diámetro de la troza en punta fina

D_f = es el diámetro del cilindro residual

e = es el espesor de las chapa

l = es la longitud de la chapa en metros

Lo que se desprende de la ecuación es que la longitud de la chapa depende en cada caso del diámetro de la punta fina de la troza ya que el diámetro del cilindro residual y el espesor de la chapa son variables fijas.

A su vez se puede estimar el tiempo (t) que se demora en desenrollar una troza conociendo la velocidad de debobinado y aplicando la siguiente ecuación:

$$t = (\pi / 4) \cdot ((D_i^2 - D_f^2) / (e \cdot v)), \text{ siendo } v \text{ la velocidad en m/s}$$

Una vez finalizado el debobinado de cada troza, el cilindro residual de 7 cm de diámetro es transportado hacia la chipeadora.

Al lado de la salida de las chapas se encuentra un sistema de mesa de bandas transportadoras para conducir las chapas hacia la guillotina. Dicha máquina posee una cuchilla que se mueve hacia abajo en fracciones de segundo, cortando a la chapa a una longitud similar a la que va a tener el tablero, además de eliminar defectos.

Automáticamente las chapas son conducidas por cintas para formar 2 fardos de chapas, uno provenientes de las trozas basales y otro de las

segundas trozas, dichas chapas son posteriormente transportadas hacia el horno de secado.

7.7.3 Secado

El objetivo es llevar a las chapas a un contenido de humedad dentro de los límites óptimos para realizar un buen encolado y un posterior prensado. El contenido de humedad de las chapas previo al secado varía entre 30 y 110 % de humedad y al finalizar el secado entre 6 y 8 %.

El procedimiento de secado es a través de un sistema continuo donde por convección el aire caliente sopla sobre la superficie de las chapas eliminando la humedad, ver Figura N° 23. El transporte de las chapas en el secador es a través de un sistema de 6 pisos de vías de rodillos. La cámara de secado posee 12 secciones y al final una zona de enfriamiento con un largo total de aproximadamente 40 metros.



Figura N° 23. Secadero continuo de chapas.

Las chapas son introducidas manualmente en el secadero, como se muestra en la figura anterior, para luego ser impulsadas automáticamente por la serie de rodillos a lo largo de la cámara de secado, donde a medida que avanzan van disminuyendo su contenido de humedad. Previo a la salida las chapas pasan por la zona de enfriamiento para disminuir su temperatura mediante ventilación con aire frío.

El tiempo aproximado para recorrer todo el secadero para las especies estudiadas fue de aproximadamente 15 minutos aunque el mismo depende de el espesor de la chapa, la temperatura del secador, la velocidad del aire y el contenido de humedad final deseada.

A la salida del secadero las chapas son clasificadas a través de una máquina que determina el contenido de humedad de las mismas, ver Figura N° 24. A las chapas con un contenido de humedad excesivo un chorro de tinta se esparce sobre la misma y pasan de nuevo por el secadero.



Figura N° 24. Máquina Clasificadora según Contenido de Humedad.

7.7.4 Clasificación de las chapas

Las chapas con un contenido de humedad adecuado pasan a ser clasificadas a mano de forma visual (Figura N° 25). Se distinguen 4 clases de chapas:

- Clear (sin defectos)
- Cara
- Contra cara
- Interior (más defectos)

Las diferentes clases se determinan observando defectos en las chapas. Los defectos principales son presencia de nudos y rajaduras. De esta manera los operarios forman 4 fardos con las diferentes clases. Dichos fardos son estacionados por un período de aproximadamente 10 a 15 días previos al armado de los tableros.



Figura N° 25. Clasificación Visual de Chapas.

Las chapas clasificadas Clear se utilizan para las tapas de los tableros y las Interior forman parte de la zona central del mismo. Las capas medias están constituidas con chapas Cara y Contra cara.

7.7.5 Encolado y Armado de los tableros

El adhesivo utilizado en dicho proceso es una cola de fenol formaldehído. Se aplica una carga de cola sobre la superficie de la chapa de 230 g/m², utilizando una encoladora de rodillos como se muestra en la figura N° 26.

De un lado de la encoladora se colocan 2 pilas de chapas, una con láminas Cara y otra con láminas Interior. Estas láminas son las que reciben en ambos lados la carga de adhesivo después de pasar por la encoladora.



Figura N° 26. Encolado de chapas en Encoladora de rodillos.

Del otro lado hay 3 pilas de chapas, una con láminas Clear, una con láminas Contra cara y otra con láminas interior.

Los tableros de LVL a fabricarse están compuestos de 9 chapas de 3,2 mm de espesor y cada tablero se conformó de la siguiente manera, las caras exteriores del mismo están compuestas de 2 chapas Clear, luego hacia el interior 2 chapas Cara, luego 2 Contra cara y en el centro 3 chapas Interior. Esto se muestra en la siguiente Figura N° 27.

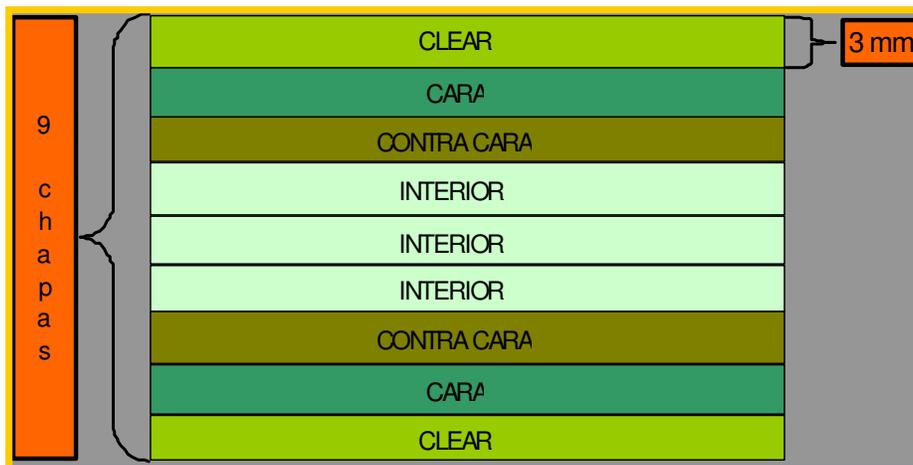


Figura N° 27. Composición de las chapas dentro del tablero según la clasificación de las mismas.

El armado del tablero LVL se realiza manualmente por superposición de las diferentes láminas. Una vez que se terminan de armar los tableros se procede al prensado en frío.

7.7.6 Prensado en frío

El prensado en frío o pre prensado asegura la dispersión uniforme del adhesivo entre las chapas y le da la adherencia al tablero para poder ser transportado hacia la prensa caliente. Esta es una prensa hidráulica fría de un solo plato que aplica presiones cercanas a los 15 kg/cm² durante 5 minutos a la pila de tableros, ver Figura N° 28.



Figura N° 28. Prensa hidráulica para prensado en frío.

7.7.7 Prensado en caliente

Para realizar dicho prensado se utiliza una prensa con múltiples platos, denominada prensa de platos calientes. Esta se carga de forma automática ya que es imprescindible cargar, cerrar la prensa y aplicar la presión total con la mayor rapidez posible. Esto es para evitar que exista un fraguado sin la presión suficiente, ver Figura N° 29.

Para cargar y descargar la prensa existen unos dispositivos en forma de repisa con el mismo número de aberturas como tiene la prensa. Los platos de la prensa son calentados con vapor de agua durante el prensado. En esta etapa la cola adquiere una adherencia duradera.



Figura N° 29. Prensa de Platos Calientes.

La duración del proceso es de 30 minutos, la temperatura de la prensa es de 140 °C, la presión es de 1,6 MPa en los primeros 10 minutos y de 1,3 MPa hasta el final del proceso. Al principio la presión es alta, luego comienza a disminuir mientras que el tablero se comienza a calentar. La temperatura en el centro del tablero es controlada durante todo el proceso.

Una vez terminado el prensado los tableros son apilados y empaquetados usando flejes metálicos para su transporte.

8. Evaluación de la calidad de los productos de ingeniería

8.1 Tableros de madera Microlaminada (LVL)

Al llegar los tableros al LATU, son dimensionados con una sierra de paneles a 2,4 m de largo por 1,2 m de ancho.

El primer paso para la evaluación es una Inspección visual donde se observan los defectos que puedan tener los tableros. Se determinaron características geométricas de los mismos como la rectitud de los cantos y la determinación de la planicidad. También se les determinan características como espesor, densidad y contenido de humedad.

8.1.1 Rectitud de los cantos

Se coloca el tablero sobre una superficie plana y horizontal tensando un hilo desde los vértices del canto cuya rectitud se quiere determinar. Se mide la desviación desde el hilo hasta el canto del tablero utilizando para esto un calibre digital.

8.1.2 Planicidad

Se coloca el tablero sobre una superficie plana y horizontal, se tensan hilos entre vértices opuestos del tablero. Se determina la mayor deformación existente entre los hilos y la superficie del tablero utilizando calibre digital o regla metálica milimetrada.

8.1.3 Confección de Probetas

De cada muestreo se seleccionaron 4 tableros para confeccionar todas las probetas de ensayo. Para esto se realiza un diseño o plan de corte para obtener las mismas. De cada tablero se obtienen probetas para:

- Densidad y Contenido de humedad
- Ensayos de Delaminación (Calidad de Encolado)
- Flexión estática tamaño real
- Flexión estática pequeñas probetas
- Esfuerzo cortante (Calidad de encolado)

Se descartan los 10 cm contra cada uno de los cantos del tablero debido a que esta zona es la más afectada a las variaciones de las condiciones a que están expuestos los tableros durante su almacenamiento y posterior transporte.

La confección de las probetas estuvo a cargo de personal técnico del LATU. Para esto se utilizó máquinas de la carpintería del laboratorio.

Cada probeta se identifica con el número de tablero, muestreo y el nombre del ensayo para la cual fue confeccionada

8.1.4 Densidad y Contenido de humedad

Para realizar dichas determinaciones se utilizaron los protocolos de ensayo PEC.FOR.PFF1 "Densidad aparente, método por dimensiones" basado en la Norma ASTM D2395 y PEC.FOR.PFF4 "Contenido de humedad" basado en las Normas ASTM D4442 y UNIT 223. De cada tablero se obtuvieron 10 probetas de 50 mm por 50 mm. Las probetas fueron obtenidas descartando los 100 mm adyacentes a cada canto del tablero.

Utilizando calibre digital con una precisión de 0,01 mm, se determinaron las dimensiones de cada probeta. Se determinan 2 medidas de cada dimensión. Luego se pesaron utilizando una balanza con una precisión de 0,001 g. Estas determinaciones se realizan con las probetas sin acondicionar.

Luego fueron colocadas en una estufa con temperatura controlada (103 ± 2 °C), ventilación y aire forzado, comenzando el secado paulatinamente hasta llegar a peso constante, de esta manera se obtiene el peso anhidro de la probeta. Para determinar el peso constante se utiliza la misma balanza anteriormente mencionada.

Se determinaron la densidad en condición de recepción de los tableros y el contenido de humedad.

La densidad en condición de recepción se calcula con la siguiente ecuación:

$$D = P_i / V_v$$

Donde:

D = densidad (g/cm³);

P_i = peso inicial de la probeta (g)

V_v = volumen en condición de recepción (cm³)

El contenido de humedad se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$CH = (P_i - P_a) / P_a * 100$$

Donde:

CH = contenido de humedad (%)

P_i = peso inicial de la probeta (g)

P_a = peso anhidro de la probeta (g)

8.1.5 Calidad de encolado

La calidad de encolado se evalúa a través de la realización de ensayos de Delaminación (envejecimiento) y Esfuerzo cortante. Estos se realizan para poder conocer la calidad de las uniones encoladas de los productos, en cuanto a su resistencia como también a como es su comportamiento luego de ser sometidos a ciclos de inmersión – secado cuyo objeto es el deterioro de dicha unión. Se utilizó norma JAS para dicha determinación.

8.1.5.1 Delaminación

Para las pruebas de delaminación se confeccionaron 6 probetas de 75 mm por 75 mm por cada tablero y por tratamiento. Se realizaron 2 tratamientos de envejecimiento; Inmersión en agua a temperatura ambiente (10-25 °C) e Inmersión en agua a 100 °C. El equipamiento utilizado fue un baño termostatzado (THOMAS T140C), que posee un termostato para el control de la temperatura y una estufa con ventilación y circulación forzada para el secado de las probetas.

La prueba de Inmersión en agua a temperatura ambiente, consiste en sumergir las probetas en agua a una temperatura de aproximadamente 20 °C por 24 horas. Luego las mismas son introducidas en la estufa a 60 ± 3 °C por 24 horas más. Una vez finalizado ese período se determina el % de delaminación. Posteriormente se realiza el ciclo de inmersión y secado nuevamente determinándose otra vez el % de delaminación.

El tratamiento de Inmersión en agua a 100 °C consiste en sumergir las probetas dentro del baño a esa temperatura durante 5 horas. Al transcurrir dicho período las probetas son extraídas del baño e introducidas en un recipiente con agua a temperatura ambiente por una hora. Luego las probetas son secadas en estufa 24 horas a 60 ± 3 °C, determinándose el % de delaminación, ver Figura N° 30. El ciclo se repite nuevamente.



Figura N° 30. Extracción de Probetas del baño termostatzado.

Para ambos tratamientos se determina el porcentaje de delaminación, utilizando regla metálica graduada en mm, en las 4 caras de cada probeta de la siguiente manera.

% Delaminación = (largo total de Delaminación / largo total de la cara de la probeta) * 100

8.1.5.2 Esfuerzo cortante

Para el ensayo de Esfuerzo Cortante se confeccionaron probetas tanto EDGEWISE (carga aplicada en el canto) como FLATWISE (carga aplicada en la cara) y un total de 6 probetas por tablero y dirección de ensayo. La probeta EDGEWISE tiene un ancho igual al espesor del tablero y un largo de 6 veces el espesor del mismo. La probeta FLATWISE un ancho de 40 mm y un largo igual que la anterior.

Para dicho ensayo se utilizó una máquina universal de ensayos, con un punto central de aplicación de carga, una distancia entre apoyos de 4 veces el espesor nominal de las probetas y una velocidad de aplicación de carga constante menor a 150 kgf/cm² (Figura N° 31). Se registra la carga máxima que resiste cada probeta.



Figura N° 31. Probeta de LVL siendo sometida al ensayo de Esfuerzo cortante en Máquina Universal.

Las flechas rojas en la Figura N° indican el cizallamiento que se produce en las líneas de encolado luego de ser sometidas las probetas al ensayo de Esfuerzo Cortante. El Esfuerzo Cortante se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$E.C = (3 \cdot C_{\text{máx}}) / (4 \cdot a \cdot e)$$

Donde:

E.C = esfuerzo cortante (MPa)

C_{máx} = Carga máxima (N)

a = ancho de la probeta (mm)

e = espesor de la probeta (mm)

8.1.6 Flexión estática para determinación del MOE y MOR

El ensayo de flexión estática se realizó tanto en probetas de tamaño real (Vigas) como en pequeñas probetas y se utilizó norma JAS para dichas determinaciones

Se obtuvieron 2 vigas por tablero uniendo 2 secciones de 100 mm de ancho y 2400 mm de largo. La unión se realizó encolando con Resorcinol ambas secciones. De esta manera se duplicó el espesor de la viga. Se utilizó una carga de adhesivo de aproximadamente 250 g/m^2 , utilizando prensado en frío. Para el prensado se utilizaron prensas manuales, donde se aplicó una presión de 10 a 15 kgf/cm^2 por 24 horas como se puede observar en la Figura N° 32. Dicha presión se reguló utilizando un torquímetro.



Figura N° 32. Elaboración de Vigas LVL, encolado y prensado.

También de cada tablero se confeccionaron pequeñas probetas tanto EDGEWISE como FLATWISE para dicho ensayo. Las probetas EDGEWISE son rectangulares con un ancho igual al espesor nominal del tablero y un largo 23 veces dicho espesor. Las probetas FLATWISE también son rectangulares con un ancho de 90 mm y el mismo largo que la anterior. Se confeccionaron 6 probetas EDGEWISE y 6 FLATWISE por tablero.

Para las vigas se utilizó una máquina universal de ensayos MINEBEA 250 kN y para las pequeñas probetas una máquina universal de ensayos MINEBEA 50 kN como se muestra en la Figura N° 33.

Mediante ensayo de flexión estática en 4 puntos se determinó el MOE y MOR de cada probeta. La distancia entre apoyos inferiores (span) fue 21 veces el espesor nominal de la probeta y la carga se aplicó en 2 puntos separados a una distancia de un tercio del span.



Figura N° 33. Ensayo de Flexión estática en vigas y pequeñas probetas LVL.

Se registro la carga máxima y la deflexión en 2 puntos de carga conocida. Dicha deflexión se determinó utilizando un extensómetro. Mediante las siguientes ecuaciones se procedió al cálculo del MOE y MOR respectivamente:

$$MOE_{4p} = \frac{\Delta P \cdot \frac{(L_0 - L_1)}{2} \cdot (2 \cdot L_0^2 + 2 \cdot L_0 \cdot L_1 - L_1^2)}{48 \cdot I \cdot \Delta y}$$

Donde:

ΔP = Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional

L_0 = Distancia entre apoyos inferiores (span)

L_1 = Distancia entre apoyos superiores de carga

I = Momento de Inercia

Δy = Diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Donde:

I = Momento de Inercia

b = Ancho de la viga

h = Altura de la viga

$$MOR_{4p} = \frac{3 \cdot P \cdot (l - a)}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Donde:

P: Carga máxima

l: Distancia entre apoyos inferiores (span)

a: Distancia desde el apoyo inferior al punto de carga superior más próximo

b: Ancho de la viga

h: Altura de la viga

8.2 Vigas laminadas y Encoladas

8.2.1 Métodos no Destructivos para determinación del MOE

Los métodos no-destructivos se utilizan para poder estimar el módulo de elasticidad (MOE) sin que la viga sufra ninguna alteración o daño. Lo que se busca con este tipo de métodos es que los mismos sean rápidos, confiables y que presenten una buena correlación con la flexión estática en máquina universal (MOR).

A cada viga se le estimó el MOE por métodos no destructivos. Se utilizaron los siguientes equipos, cuyo principio de funcionamiento fue descrito en capítulos anteriores:

- Método de vibración longitudinal, se utiliza un equipo denominado FFT ANALYZER. En la figura N° 34 se observa cómo se realiza dicho ensayo y en recuadro aparece la pantalla donde se puede observar la frecuencia principal de vibración.

- Método de velocidad de propagación de una onda inducida FAKOPP, ver Figura N° 35.
- Método de velocidad de propagación de ultrasonido SYLVATEST.



Figura N° 34. Viga laminada siendo evaluada a través del FFT ANALYZER.



Figura N° 35. Viga laminada siendo evaluada a través del FAKOPP.

Teniendo en cuenta el MOE (flexión por pesas) de cada una de las láminas y su momento de inercia (que es función de su ubicación de las láminas dentro de la viga), se determinó un MOE teórico.

8.2.2 Flexión estática para la determinación del MOE y el MOR

En la máquina universal de ensayos, mediante el ensayo de flexión en 4 puntos, se determinó el MOE, midiendo el desplazamiento en la línea neutra y el MOR. En la Figura N° 36 se puede observar una viga laminada durante el ensayo de Flexión y en el recuadro la falla que se produce luego de alcanzar la carga máxima.



Figura N° 36. Viga laminada siendo ensayada en Máquina Universal.

En la siguiente figura N° 37 se puede ver el esquema del ensayo de flexión donde h es el espesor nominal de las vigas, l es el Span o distancia entre apoyos que en este caso es de 2160 mm, S es la distancia de separación entre los puntos de aplicación de la carga que en este caso fue de 480mm y L es el largo de la viga. Se utilizó Norma JAS para realizar dicha determinación y las fórmulas de cálculo son las mismas que se describen para LVL. Las vigas se ensayaron solamente sobre las caras FLATWISE.

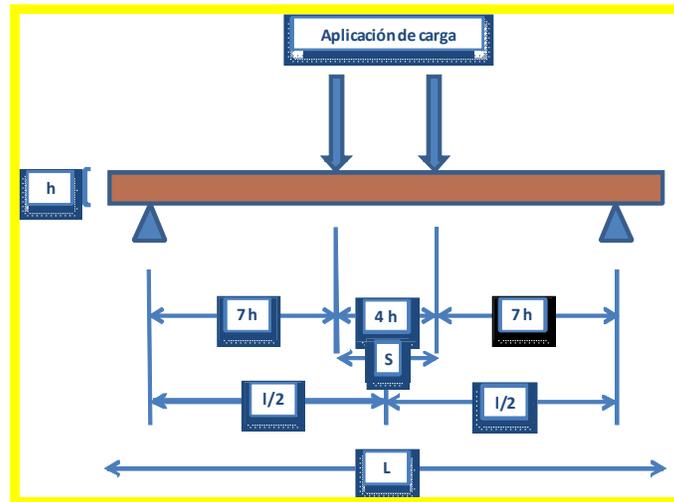


Figura N° 37. Esquema Flexión estática 4 puntos.

8.2.3 Evaluación de la calidad de encolado

Dicha evaluación se realizó a través de los ensayos de Esfuerzo cortante sobre la línea de encolado y ensayos de envejecimiento para determinar el % de Delaminación.

8.2.3.1 Esfuerzo cortante sobre la línea de encolado

De cada una de las vigas ensayadas se elaboraron 6 probetas según Norma JAS, para fabricación de madera laminada como se muestra en la siguiente Figura N° 38, donde t es el espesor de cada lámina que compone la viga. Las unidades del esquema son en mm.

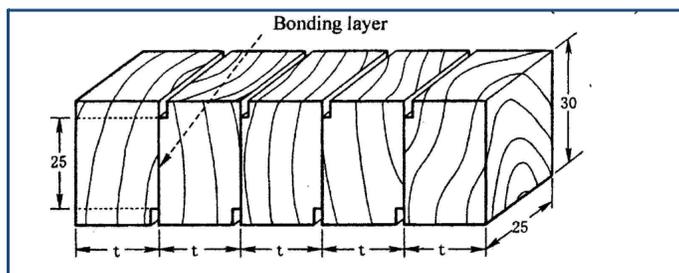


Figura N° 38. Esquema y foto de probetas de Esfuerzo cortante en la línea de encolado.

Se determinó las dimensiones del área encolada y luego se realizó el ensayo en máquina universal mediante compresión en cada una de las líneas de cola de cada probeta, se observa con la flecha roja en la Figura N° 39 el momento que se produce el cizallamiento por compresión en la línea de encolado.

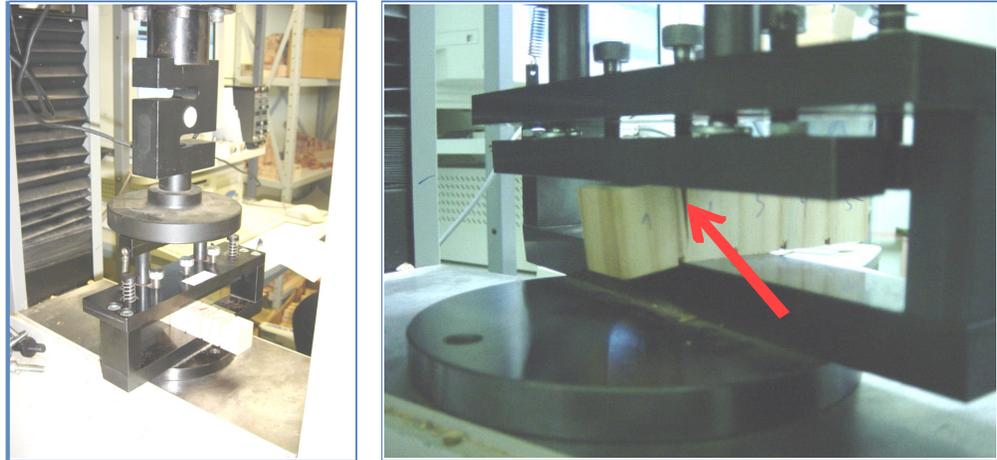


Figura N° 39. Ensayo de Esfuerzo cortante en Vigas Laminadas.

Se registró la carga máxima y mediante la siguiente ecuación se determinó el esfuerzo cortante.

$$\text{Esfuerzo Cortante (MPa)} = \text{Carga Máxima (N)} / \text{Área de encolado (mm}^2\text{)}$$

Una vez finalizado el ensayo, se realizó de forma visual la determinación del % de Falla en Madera de cada sección de cada probeta (Figura N° 40). Este valor corresponde al cociente entre el área de ensayo donde se produjo la rotura en la madera y el área de la probeta, es un indicador de la resistencia de la unión encolada, por consiguiente, un valor alto de falla en la madera indica que la unión es más resistente.



Figura N° 40. Falla en Madera en probetas de Esfuerzo Cortante.

8.2.3.2 Ensayos de delaminación

Se confeccionaron de cada viga ensayada 4 probetas de 75 mm de largo, 2 para ensayo de Inmersión en agua a temperatura ambiente y 2 para el ensayo de Inmersión en agua a 100° C. El equipamiento es el mismo que para LVL. Estos ensayos se realizaron utilizando Norma JAS.

Luego de los ensayos se determina el % de Delaminación de la siguiente manera:

% de Delaminación: Largo total de delaminación (mm) / Largo total de la línea de encolado

Las etapas del ensayo de Inmersión en agua a temperatura ambiente (20 °C) son las siguientes:

- Inmersión por 24 horas en agua a temperatura ambiente (10 – 25° C)
- Secado en estufa con circulación forzada por 24 horas a una temperatura de 70° C \pm 3° C, Figura N° 41.
- Determinación del % de delaminación en cada cara y línea de encolado de cada probeta
- Se repite el ciclo



Figura N° 41. Probetas dentro del Baño luego de la Inmersión y las mismas siendo secadas en estufa.

El ensayo de Delaminación en agua caliente (100° C) se realiza en un tanque termostatzado donde se controla la temperatura. Las etapas son las siguientes:

- Inmersión por 4 horas en agua a temperatura de 100° C
- Inmersión en agua a temperatura ambiente por una hora
- Secado en estufa con circulación forzada por 24 horas a una temperatura de 70° C \pm 3° C
- Determinación del % de Delaminación en cada cara y línea de encolado de cada probeta, Figura N° 42.
- Se repite el ciclo



Figura N° 42. Determinación del % de Delaminación.

El porcentaje de Delaminación se obtiene midiendo el largo de las delaminación de cada línea de encolado como se muestra en la Figura N° 42.

8.2.4 Contenido de humedad y Densidad

Se confeccionaron 2 probetas de cada viga, se le determinaron las dimensiones, el peso inicial y se colocaron en estufa a 103° C hasta peso

constante. Luego se determinó la densidad y el contenido de humedad de cada viga según PEC.FOR.PFF1 y PEC.FOR.PFF4.

8.2.5 Flexión uniones finger joint

Láminas similares a las que se utilizaron para la fabricación de las vigas laminadas y que no se usaron, fueron ensayadas en flexión en 4 puntos en máquina universal, donde se determinó el MOE y MOR de probetas de cada especie y muestreo, ver Figura N° 43.



Figura N° 43. Probeta de Finger Joint sometida al ensayo de Flexión estática.

Cada probeta presentaba la unión dentada en el centro de la misma y las siguientes dimensiones un largo de 630 mm de largo, 45 mm de ancho (b) y un espesor de 24 mm (d).

En la siguiente figura N° 44 se puede ver el esquema del ensayo de flexión siendo la distancia inferiores de apoyo (24d) de 576 mm, mientras que la distancia entre los puntos de aplicación de carga fue de 192 mm (8d). Para dicha determinación se utilizó la Norma ASTM 5572 “Adhesives Used for Finger Joints in Nonstructural Lumber Products”.

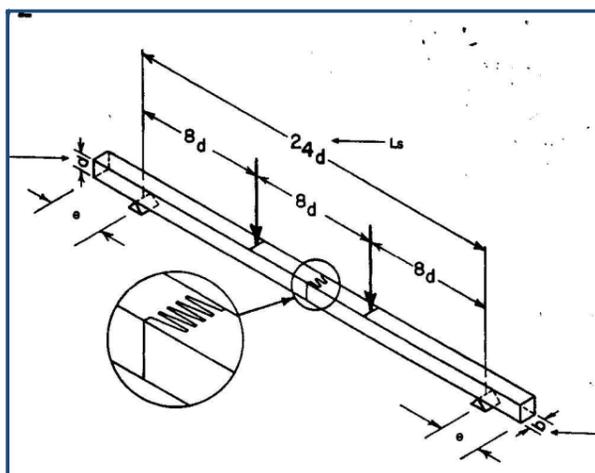


Figura N° 44. Esquema del ensayo de Flexión Estática Finger Joint.

Para las vigas laminadas de *Eucalyptus grandis* se evaluaron además de las uniones finger joint encoladas con Acetato de Polivinilo (PVA), con emulsión de Polímeros de ISOCIANATO en base de RESORCINOL-FORMOL. Para las vigas de *Pinus taeda* uniones con Acetato de Polivinilo (PVA) y uniones con emulsión de Polímeros de ISOCIANATO.

9. RESULTADOS

9.1 Resultados de los ensayos no destructivos y destructivos realizados en árboles en pie, en trozas basales, tablas verdes y tablas secas

En las siguientes Tablas N° 8, N° 9, N° 10 y N° 11 se presentan los resultados de los ensayos no destructivos y destructivos para las dos especies y los muestreos realizados. La densidad en cada tabla corresponde a la densidad en estado verde, determinada mediante el cociente entre el peso y volumen en la condición de ensayo. Y la densidad aparente corriente es la determinada mediante el cociente entre peso anhidro obtenido luego de secar la probeta en estufa a 103° C y el volumen próximo al 12% de contenido de humedad. La densidad de las tablas secas que denominamos densidad en condición seca el al obtenida mediante el cociente entre peso seco obtenido luego de secado en horno convencional y el volumen de la tabla en la misma condición.

Se presentan los resultados de árboles en pie, trozas y tablas basales ya que permiten realizar una trazabilidad desde el árbol a la tabla. Las segundas trozas no fueron incluidas debido a que el ensayo en el árbol en pie no fue realizado.

Tabla N° 8. Resultados ensayos no destructivos y destructivos para *E. grandis* Muestreo 1 de Rivera.

	Árbol en pie		Trozas Basales					
	Densidad verde (g/cm ³)	Fakopp (MPa)	Densidad verde (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)		
Media	1,030	12068	0,926	10630	11826	13063		
STD	0,073	1160	0,061	1061	1114	1211		
CV %	7,1	9,6	6,5	10,0	9,4	9,3		
Máximo	1,133	14548	1,010	13303	14160	15457		
Mínimo	0,801	10257	0,767	9147	10430	11569		
N	20			20				
	Tablas Verdes				Tablas Secas			
	Densidad verde (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)	Densidad Tablas secas (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)
Media	0,918	11145	11516	12459	0,491	12395	12183	13475
STD	0,064	1476	1129	1419	0,041	1704	1336	1551
CV %	7,0	13,2	9,8	11,4	8,3	13,7	11,0	11,5
Máximo	1,048	14644	14237	15525	0,550	16808	14924	16662
Mínimo	0,790	8660	9828	10185	0,431	9368	10085	10989
N	93				82			
	Tablas para Máquina Universal				Ensayo Máquina universal		Ensayo Máq. Universal Tablas C	
	Densidad Tablas secas (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Media	0,491	12283	11313	13852	10863	56,1	11698	63,4
STD	0,041	1411	1056	1319	1068	8,8	1253	10,0
CV %	8,3	11,5	9,3	9,5	9,8	15,7	10,7	15,7
Máximo	0,555	15602	13713	17050	13295	69,8	14472	79,6
Mínimo	0,414	10104	9938	12123	8983	42,9	9184	42,7
N	57						20	

Tabla Nº 9. Resultados ensayos no destructivos y destructivos para *E. grandis* Muestreo 2 de Paysandú.

	Árbol en pie		Trozas Basales					
	Densidad verde (g/cm ³)	Fakopp (MPa)	Densidad verde (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)		
Media	0,962	11095	0,828	11580	12572	13839		
STD	0,073	1073	0,052	1130	1187	1404		
CV %	7,6	9,7	6,2	9,8	9,4	10,1		
Máximo	1,088	13233	0,903	14316	15221	17176		
Mínimo	0,774	9392	0,697	9582	10616	11415		
N	20		20					
	Tablas Verdes				Tablas Secas			
	Densidad verde (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)	Densidad Tablas secas (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)
Media	0,815	11499	12150	13024	0,507	12661	12559	13856
STD	0,060	868	989	1048	0,042	1014	1059	1203
CV %	7,3	7,6	8,1	8,0	8,2	8,0	8,4	8,7
Máximo	0,904	13791	14863	15640	0,585	15100	15135	16881
Mínimo	0,677	9719	10178	10859	0,418	10807	10619	11777
N	96				88			
	Tablas para Máquina Universal				Ensayo Máquina universal		Ensayo Máq. Universal Tablas C	
	Densidad Tablas secas (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Media	0,511	12521	11766	14269	11053	50,5	11603	56,5
STD	0,043	1106	1010	1203	973	8,6	1099	11,5
CV %	8,4	8,8	8,6	8,4	8,8	17,1	9,5	20,3
Máximo	0,600	14883	14082	17052	12956	63,3	13837	70,9
Mínimo	0,442	10896	9964	12074	9679	30,2	9856	31,7
N	53						20	

Tabla Nº 10. Resultados ensayos no destructivos y destructivos para *P. taeda* Muestreo 3 de Tacuarembó.

	Árbol en pie		Trozas Basales					
	Densidad verde (g/cm ³)	Fakopp (MPa)	Densidad verde (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)		
Media	0,986	6798	0,954	4877	6816	3229		
STD	0,045	1355	0,039	845	1025	441		
CV %	4,6	19,9	4,1	17,3	15,0	13,7		
Máximo	1,034	9027	1,013	6153	8677	3934		
Mínimo	0,882	4301	0,890	3184	4928	2359		
N	19		19					
	Tablas Verdes				Tablas Secas			
	Densidad verde (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)	Densidad Tablas secas (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)
Media	0,945	4549	5860	5782	0,435	5685	5979	6532
STD	0,027	709	847	872	0,020	766	710	812
CV %	2,9	15,6	14,5	15,1	4,6	13,5	11,9	12,4
Máximo	0,978	5914	7058	6962	0,469	6813	6957	7633
Mínimo	0,870	3221	4216	4126	0,405	4248	4522	4895
N	103				99			
	Tablas para Máquina Universal				Ensayo Máquina universal		Ensayo Máq. Universal Tablas C	
	Densidad Tablas secas (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Media	0,433	5496	6061	6907	5108	29,0	6263	37,3
STD	0,018	912	714	824	983	8,5	1213	11,8
CV %	4,2	16,6	11,8	11,9	19,2	29,4	19,4	31,5
Máximo	0,471	7142	7292	8319	6866	46,3	8886	54,1
Mínimo	0,406	4123	4727	5272	3237	16,1	4487	18,4
N	57						19	

Tabla Nº 11. Resultados ensayos no destructivos y destructivos para *P. taeda* Muestreo 4 de Paysandú.

	Árbol en pie		Trozas Basales					
	Densidad verde (g/cm ³)	Fakopp (MPa)	Densidad verde (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)		
Media	0,951	5507	0,808	4161	5798	3006		
STD	0,046	923	0,043	581	740	918		
CV %	4,9	16,8	5,4	14,0	12,8	30,6		
Máximo	1,025	6986	0,864	4934	6866	5719		
Mínimo	0,846	3872	0,699	3068	4455	2181		
N	20		20					
	Tablas Verdes				Tablas Secas			
	Densidad verde (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)	Densidad Tablas secas (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)
Media	0,915	4731	5963	5936	0,449	5868	5994	6466
STD	0,031	642	712	772	0,024	791	680	760
CV %	3,4	13,6	11,9	13,0	5,4	13,5	11,3	11,8
Máximo	0,958	5681	6884	6813	0,495	6868	6771	7354
Mínimo	0,847	3590	4638	4472	0,407	4416	4604	4911
N	96				92			
	Tablas para Máquina Universal				Ensayo Máquina universal		Ensayo Máq. Universal Tablas C	
	Densidad Tablas secas (g/cm ³)	FFT (MPa)	Fakopp (MPa)	Sylvarest (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Media	0,454	5561	5746	6481	5284	38,5	5790	41,9
STD	0,027	621	511	649	757	8,2	912	13,7
CV %	6,0	11,2	8,9	10,0	14,3	21,3	15,8	32,8
Máximo	0,504	6597	6554	7406	6563	51,1	6977	58,5
Mínimo	0,405	4417	4591	5115	3987	23,9	4008	12,0
n	61						20	

9.2 Resultados Tablas ensayadas en Máquina Universal utilizando madera de ambas trozas de cada árbol.

En las siguientes Tablas N° 12, N° 13, N° 14 y N° 15 se presentan los resultados obtenidos de ensayos no destructivos y los resultados del ensayo en máquina universal de todas las tablas obtenidas. Aquí se utilizaron tanto las tablas de las trozas basales y segundas trozas. La densidad que se presenta es la aparente corriente, donde el peso utilizado es el peso anhidro, obtenido luego de secar la probeta en estufa a 103° C y el volumen próximo al 12% de contenido de humedad. También se presentan los resultados del Contenido de humedad que presentan las tablas.

Los resultados de MOE y MOR del ensayo en Máquina Universal son los que se utilizaron para realizar la comparación entre los productos de Ingeniería de la Madera y Madera Sólida.

Tabla N° 12. Resultados Tablas ensayadas por métodos no destructivos y en Máquina Universal para determinar MOE y MOR para *E. grandis* Muestreo 1 – Rivera.

<i>Eucalyptus grandis</i> Muestreo 1 - Rivera (107 tablas ensayadas)						
Parámetro	MOE (MPa) métodos no destructivos		MOE (MPa) Máq. Universal	MOR (MPa) Máq. Universal	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	Contenido de humedad (%)
	FFT	Fakopp				
Media	12553	11583	11228	53,6	0,430	11,5
STD	1902	1406	1874	14,6	0,047	0,3
C.V (%)	15,1	12,1	16,7	27,2	10,8	2,9
máximo	18439	16443	17936	80,0	0,581	12,2
Mínimo	8781	9275	6981	16,4	0,356	10,1

Tabla N° 13. Resultados Tablas ensayadas por métodos no destructivos y en Máquina Universal para determinar MOE y MOR para *E. grandis* Muestreo 2 – Paysandú.

<i>Eucalyptus grandis</i> Muestreo 2 - Paysandú (100 tablas ensayadas)						
Parámetro	MOE (MPa) métodos no destructivos		MOE (MPa) Máq. Universal	MOR (MPa) Máq. Universal	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	Contenido de humedad (%)
	FFT	Fakopp				
Media	12595	12001	11003	49,0	0,447	12,2
STD	1603	1310	1581	14,2	0,042	0,4
C.V (%)	12,7	10,9	14,4	29,0	9,4	2,9
Máximo	15850	15250	15186	74,4	0,588	13,2
Mínimo	8377	9382	6857	19,6	0,378	11,4

De las dos tablas anteriores se puede observar que los resultados obtenidos de MOE y MOR en máquina universal son levemente superiores para el Muestreo 1 de Rivera.

Tabla N° 14. Resultados Tablas ensayadas por métodos no destructivos y en Máquina Universal para determinar MOE y MOR para *P. taeda* Muestreo 3 – Tacuarembó.

<i>Pinus taeda</i> Muestreo 3 – Tacuarembó (120 tablas ensayadas)						
Parámetro	MOE (MPa) métodos no destructivos		MOE (MPa) Máq. Universal	MOR (MPa) Máq. Universal	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	Contenido de humedad (%)
	FFT	Fakopp				
media	5887	6450	5397	23,7	0,361	9,8
STD	1256	1082	1336	11,7	0,031	0,5
C.V (%)	21,3	16,8	24,7	49,4	8,6	4,6
máximo	9485	9209	8886	54,1	0,464	11,1
mínimo	3159	4070	2217	5,3	0,307	9,0

Tabla N° 15. Resultados Tablas ensayadas por métodos no destructivos y en Máquina Universal para determinar MOE y MOR para *P. taeda* Muestreo 4 – Paysandú.

<i>Pinus taeda</i> Muestreo 4 - Paysandú (119 tablas ensayadas)						
Parámetro	MOE (MPa) métodos no destructivos		MOE (MPa) Máq. Universal	MOR (MPa) Máq. Universal	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	Contenido de humedad (%)
	FFT	Fakopp				
media	5365	5686	5017	30,0	0,381	10,3
STD	857	732	952	14,4	0,038	0,4
C.V (%)	16,0	12,9	19,0	47,9	10,0	3,8
máximo	7968	7628	6977	58,5	0,481	11,5
mínimo	3444	3785	3055	3,9	0,312	9,5

Observando los resultados para *P. taeda* vemos que existen diferencias entre los dos muestreos. El valor de MOE obtenido en máquina Universal es superior en 300 MPa para el muestreo de Tacuarembó en relación al de Paysandú. Lo contrario ocurre con el MOR donde las tablas del muestreo de Paysandú presentan un resultados de MOR superior en 6 MPa.

9.3 Rendimiento Aserrado

En la siguiente Tabla N° 16 se muestran por especie y muestreo el Volumen de trozas, tablas verdes y tablas secas; la cantidad según la clasificación de las mismas para cada caso; el número de tablas obtenidas y el Rendimiento luego del aserrado y del secado comparado con el volumen de trozas.

Tabla N° 16. Rendimiento de Tablas Verdes y Secas en relación al volumen de trozas para ambas especies y muestreos realizados.

<i>Eucalyptus grandis</i> Muestreo 1. Rivera					
Trozas		Tablas Verdes		Tablas Secas	
Volumen (m3)	8,5	Volumen (m3)	3,0	Volumen (m3)	2,5
N° Trozas	40	Clasificación BA	66	Clasificación BA	48
Grado I	21	Clasificación B	56	Clasificación B	54
Grado II	17	Clasificación C	50	Clasificación C	49
Grado III	2	N° Tablas	172	N° Tablas	151
Grado IV	0	Rendimiento (%)	36	Rendimiento (%)	29
<i>Eucalyptus grandis</i> Muestreo 2. Paysandú					
Trozas		Tablas Verdes		Tablas Secas	
Volumen (m3)	8,1	Volumen (m3)	2,9	Volumen (m3)	2,3
N° Trozas	40	Clasificación BA	49	Clasificación BA	32
Grado I	17	Clasificación B	66	Clasificación B	58
Grado II	15	Clasificación C	46	Clasificación C	45
Grado III	5	N° Tablas	161	N° Tablas	135
Grado IV	3	Rendimiento (%)	36	Rendimiento (%)	29
<i>Pinus taeda</i> Muestreo 3. Tacuarembó					
Trozas		Tablas Verdes		Tablas Secas	
Volumen (m3)	6,6	Volumen (m3)	2,2	Volumen (m3)	2,0
N° Trozas	40	Clasificación A	47	Clasificación A	46
Grado I	9	Clasificación B	56	Clasificación B	55
Grado II	19	Clasificación C	77	Clasificación C	75
Grado III	11	N° Tablas	180	N° Tablas	176
Grado IV	1	Rendimiento (%)	34	Rendimiento (%)	31
<i>Pinus taeda</i> Muestreo 4. Paysandú					
Trozas		Tablas Verdes		Tablas Secas	
Volumen (m3)	5,6	Volumen (m3)	1,9	Volumen (m3)	1,7
N° Trozas	40	Clasificación A	48	Clasificación A	48
Grado I	5	Clasificación B	50	Clasificación B	46
Grado II	13	Clasificación C	59	Clasificación C	59
Grado III	16	N° Tablas	157	N° Tablas	153
Grado IV	6	Rendimiento (%)	34	Rendimiento (%)	31

De la tabla anterior se puede observar es que los rendimientos son similares para ambas especies y muestreos. Si bien *E. grandis* presenta mejor resultado en el rendimiento luego del aserrado, *P. taeda* mejora el rendimiento luego del secado ya que el rendimiento disminuye un 3% en relación al

rendimiento luego del aserrado comparado con un 7% para *E. grandis*. Esto último se debe a la facilidad de secar al *P. taeda* en relación a *E. grandis*.

Observando los grados de clasificación de las trozas vemos que para *E. grandis* se obtuvieron mayor proporción de trozas Grado I, que son trozas derechas, sin nudos y de baja conicidad, en relación a *P. taeda* donde hay más proporción Grado III y IV que presentan más defectos y conicidad.

En relación a la clasificación de tablas la proporción luego del aserrado, como luego del secado en relación al total de tablas obtenidas está dividida en tercios para el Muestreo 1 de *E. grandis*, en tanto que para el muestreo 2 de *E. grandis* hay mayor proporción de Tablas B luego del aserrado como luego del secado. En el Muestreo 3 de *P. taeda* hay mayor proporción de Tablas C, mientras que para el muestreo 4 de *P. taeda* las clasificación está dividida en tercios.

9.4 Rendimiento Debobinado

En la siguiente Tabla N° 17 se observan los resultados del Rendimiento luego del debobinado de las trozas. Se presentan los resultados promedio de ambas especies y no diferenciado por muestreo debido a que no existen diferencias entre muestreos.

Tabla N° 17. Rendimiento de Debobinado de Trozas por especie.

Especie	<i>E. grandis</i>	<i>P. taeda</i>
Volumen torzas (m ³)	3,09	3,16
Volumen teórico debobinado (m ³)	1,52	1,33
Rendimiento teórico debobinado	49,0	42,1
Volumen Chapas secas (m ³)	0,67	1,20
Rendimiento luego del secado	21,6	38,0
Total Chapas enteras (2,4 x 1,2 m)	83	149
Chapas Clear	19	42
Chapas Cara	15	46
Chapas Tras cara	23	42
Chapas Interior	27	19

En la tabla se puede observar el rendimiento teórico de debobinado que surge de la fórmula de cálculo donde se tiene en cuenta el diámetro de la troza en punta fina y el diámetro del cilindro residual. Se puede observar que *E.*

grandis presentan un rendimiento superior a *P. taeda* debido principalmente a la menor conicidad de las trozas.

Luego del secado de las chapas se observa que *P. taeda* presenta un rendimiento superior que *E. grandis* ya que se obtiene un volumen mayor de chapas enteras.

A continuación se presentan los resultados de los tableros micro laminados y las vigas laminadas por muestreo y especie para todas las propiedades estudiadas.

9.5. Resultados de Madera microlaminada (LVL)

9.5.1 Densidad y contenido de humedad

En la siguiente Tabla N° 18 se observan los resultados de Contenido de Humedad y Densidad. El objetivo fue medir 40 probetas por muestreo, o sea 10 probetas por tablero. En el caso de *Pinus taeda* / Tacuarembó las probetas evaluadas fueron 34 debido a que no se pudieron extraer mayor cantidad de probetas.

Tabla N° 18 Densidad y Contenido de Humedad de LVL según especie y muestreo.

Especie/Muestreo	N° de Probetas	Contenido Humedad (%)	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	
			Media	Desv. std
<i>E.grandis</i> /Rivera	40	9,8	0,515	0,014
<i>E.grandis</i> /Paysandú	40	10,0	0,507	0,029
<i>P.taeda</i> /Tacuarembó	34	12,2	0,449	0,026
<i>P.taeda</i> /Paysandú	40	11,4	0,452	0,035

Los resultados muestran que existen diferencias de Densidad entre especies pero no entre muestreos y que el LVL de *Eucalyptus grandis* es más denso que los de *Pinus taeda*. En relación al contenido de humedad los valores se encuentran entre 10 – 12 %, cumpliendo el objetivo planteado en el Proyectos donde los valores medios debían estar por debajo de 14 %.

9.5.2 Flexión estática (MOE y MOR) en 4 puntos de Vigas de LVL (54 x 100 x 2400mm)

De cada tablero se confeccionaron 2 vigas uniendo secciones como se explicó anteriormente y las mismas fueron evaluadas para determinar MOE y MOR en una máquina universal de ensayos. Las vigas fueron evaluadas aplicando la carga con las líneas de encolado verticales, o sea EDGEWISE. Esto fue debido al diseño de la probeta para poder ser ensayada en máquina universal. En la Tabla N° 19 se presentan los resultados obtenidos para MOE y MOR de las Vigas de LVL luego del ensayo de flexión estática en máquina universal.

Tabla N° 19 Resultados Promedio de MOE y MOR para Vigas de LVL según especie y muestreo.

Flexión estática (4 puntos) en Máquina Universal (MPa)						
Especie / Muestreo	N° de Vigas	MOE		MOR		Clasificación según Norma JAS
		Media	Desv. std	Media	Desv. std	
<i>E.grandis</i> / Rivera	8	12778	593	66,0	3,2	120-140E
<i>E.grandis</i> / Paysandú	8	13266	680	65,9	6,2	120-140E
<i>P.taeda</i> / Tacuarembó	7	6200	454	35,9	2,9	60-70E
<i>P.taeda</i> / Paysandú	8	5194	597	29,4	8,6	<60E

Comparando los resultados según las zona del país donde se realizó el muestreo, los resultados de MOE y MOR de las Vigas de LVL de *E. grandis* no presentan grandes diferencias entre sí, no ocurriendo los mismos para *P. taeda* donde los resultados del muestreo de Tacuarembó son un 16 % superiores en promedio en MOE y un 18 % superiores en MOR que los resultados del muestreo de Paysandú. Si comparamos los resultados según especie, las vigas de *E. grandis* son aproximadamente 50% superiores en MOE y MOR que las de *P. taeda*.

Tabla N° 20. Grados de Vigas LVL en base a MOE y MOR según Norma JAS.

Grados de MOE	MOE (MPa)		MOR (MPa)		
	Valor Medio	Valor Mínimo	Especial	Grado 1	Grado 2
180E	17653	15201	57,9	49,5	41,7
160E	15691	13730	51,5	44,1	36,8
140E	13730	11768	45,1	38,7	32,4
120E	11768	10297	40,2	34,3	27,5
100E	9807	8336	32,4	27,5	23,0
80E	7846	6865	25,5	22,1	18,6
70E	6865	5884	22,1	19,1	15,7
60E	5884	4904	19,1	16,2	13,7

Según la Clasificación de la norma JAS “Manufacturing Standard for Structural Laminated Veneer Lumber”, Tabla N° 20, para LVL las vigas de E. grandis tiene un grado para uso estructural entre 120-140E, lo que indica que se encuentra en las categorías superiores. Para LVL de P. taeda el grado es de 60E para el muestreo de Tacuarembó y menor a 60E para Paysandú, siendo estos los valores más bajos de dicha clasificación. La clasificación se realizó en base a la media de los valores obtenidos.

Lo que se puede decir es que los valores de MOR obtenidos para las dos especies son superiores a los valores de la categoría a la que pertenecen según la clasificación Norma JAS.

9.5.3 Flexión estática (MOE y MOR) pequeñas probetas

De cada tablero se confeccionaron 6 probetas Edgewise y 6 Flatwise evaluándose 4 tableros por muestreo. En máquina universal se determinó el MOE y MOR de las mismas a partir del ensayo de flexión estática en 4 puntos. En los casos en que el número de probetas fue inferior se debió a la imposibilidad de confeccionar dichas probetas por la presencia de algunos defectos varios. A continuación se presentan en la Tabla N° 21, los resultados de MOE y MOR de los cuatro muestreos según la dirección de uso de los mismos.

Tabla N° 21. Resultados de MOE y MOR de pequeñas probetas de LVL según especie, muestreo y dirección del ensayo.

Especie / Muestreo	Dirección de uso	N° de Probetas	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Clasificación según Norma JAS
			Media	Desv. std	Media	Desv. std	
<i>E.grandis</i> / Rivera	Edgewise	20	12792	794	73,3	5,2	120-140E
	Flatwise	18	13215	1168	82,0	4,8	120-140E
<i>E.grandis</i> / Paysandú	Edgewise	24	13267	1252	69,6	5,5	120-140E
	Flatwise	24	14303	1271	84,2	8,8	140-160E
<i>P.taeda</i> / Tacuarembó	Edgewise	19	6149	631	44,4	6,1	60-70E
	Flatwise	14	6895	780	47,6	6,4	70-80E
<i>P.taeda</i> / Paysandú	Edgewise	24	4983	772	49,4	6,3	<60E
	Flatwise	24	4850	648	43,2	6,7	<60E

Observando los resultados de la flexión estática en pequeñas probetas los mismos son muy similares a los de las vigas de LVL, donde las probetas de LVL de *E. grandis* presentan resultados superiores que las de *P. taeda* tanto en MOE como en MOR.

Según la clasificación de la Norma JAS “Manufacturing Standard for Structural Laminated Veneer Lumber”, Tabla N° 22, las probetas que tienen mejor grado son las de *E. grandis* del muestreo de Paysandú con valores de 120-140E para Edgewise y 140-160E para Flatwise. Las probetas de *P. taeda* presentan valores que están en la categoría más baja y aún menores.

Tabla N° 22. Grados según MOE y MOR según Norma JAS para LVL pequeñas probetas.

Grados de MOE	MOE (MPa)		MOR (MPa)		
	Valor Medio	Valor Mínimo	Especial	Grado 1	Grado 2
180E	17653	15201	66,2	56,9	47,6
160E	15691	13730	58,8	50,5	42,2
140E	13730	11768	51,5	44,1	36,8
120E	11768	10297	44,1	37,8	31,4
100E	9807	8336	36,8	31,4	26,5
80E	7846	6865	29,4	25,0	20,6
70E	6865	5884	25,5	22,1	18,1
60E	5884	4904	22,1	18,6	15,7

Sucede lo mismo que para las vigas de LVL en relación al valor de MOR obtenido comparado con los de la categoría JAS, siendo en todos los casos superior el resultado para ambas especies y dirección de ensayo.

En los siguientes gráficos N° 1 y 2 se observan los resultados en conjunto de MOE y MOR para Vigas de LVL, pequeñas probetas Edgewise y pequeñas probetas Flatwise de LVL.

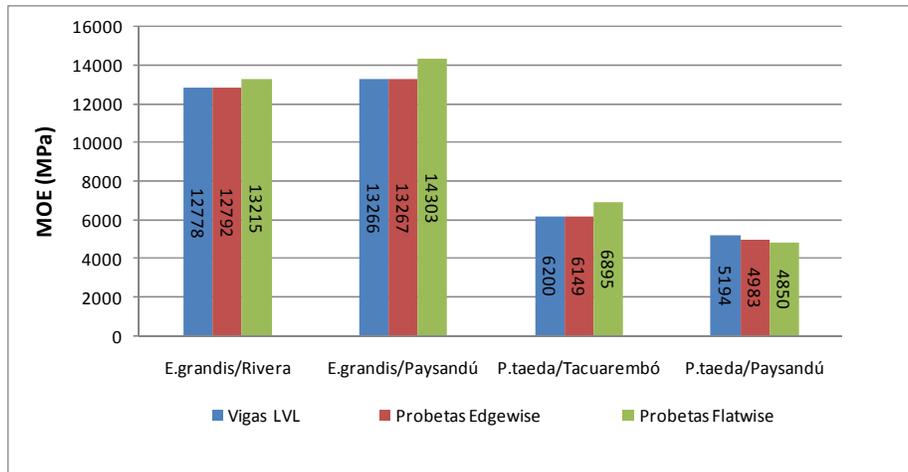


Gráfico N° 1. Resultados MOE para Vigas de LVL, pequeñas probetas Edgewise y pequeñas probetas Flatwise de LVL.

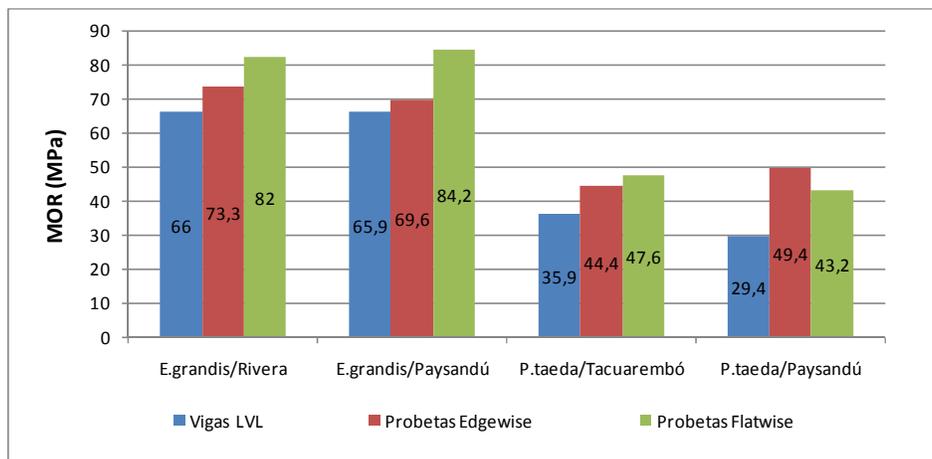


Gráfico N° 2. Resultados MOR para Vigas de LVL, pequeñas probetas Edgewise y pequeñas probetas Flatwise de LVL.

9.5.4 Calidad de encolado

Como se explicó anteriormente la calidad de las uniones encoladas de los Tableros LVL se evaluó a través de los Ensayos de Delaminación luego de tratamientos de Inmersión en agua con diferentes condiciones y por el Ensayo de Esfuerzo Cortante a través de una flexión en 3 puntos con una corta distancia de separación entre apoyos.

Para los tratamientos de Inmersión se evaluaron un total de 12 probetas por tablero, 6 para cada tratamiento. Para Esfuerzo cortante se evaluaron 6 probetas para cada dirección de ensayo por tablero. Se ensayaron probetas Edgwise (Carga aplicada con las líneas de encolado verticales) y probetas Flatwise (Carga aplicada con las líneas de encolado horizontales).

9.5.4.1 Delaminación

Luego de la realización de los tratamientos de Inmersión en agua a 20°C y en agua Hirviendo y luego de repetir los ciclos, no se observó delaminación en ninguna probeta de ninguna de las 2 especies estudiadas.

Al no presentarse ninguna delaminación en ninguna probeta se puede decir que el adhesivo (Fenol Formaldehído) utilizado para la fabricación del LVL es un buen adhesivo para dicho fin. Además del adhesivo influyen en la formación de uniones muy resistentes a los diferentes tratamientos de envejecimiento, una buena aplicación del mismo, el proceso de prensado y el fraguado.

9.5.4.2 Esfuerzo cortante

En la siguiente Tabla N° 23 se observan los valores promedio de esfuerzo Cortante para las probetas de LVL por especie, muestreo y dirección de ensayo evaluándose 24 probetas para cada uno.

Tabla N° 23. Resistencia al Esfuerzo Cortante en LVL según especie, muestreo y dirección de ensayo.

Especie / Muestreo	Esfuerzo Cortante (MPa)			Clasificación según Norma JAS
	Dirección de ensayo	Media	Desv. std	
<i>E.grandis</i> / Rivera	Edgewise	6,0	0,35	65V-55H
	Flatwise	5,8	0,30	
<i>E.grandis</i> / Paysandú	Edgewise	5,1	0,40	50V-43H
	Flatwise	5,4	0,39	
<i>P.taeda</i> / Tacuarembó	Edgewise	5,1	0,62	50V-43H
	Flatwise	4,8	0,59	
<i>P.taeda</i> / Paysandú	Edgewise	5,4	0,63	55V-47H
	Flatwise	4,9	0,57	

Lo que se puede observar es que en general las probetas de *E. grandis* presentan valores superiores a las de *P. taeda* y además las probetas de LVL de *E. grandis* del muestreo de Rivera son superiores a las del muestreo de Paysandú.

En general los resultados las probetas Edgewise son superiores que las Flatwise. Esto último se debe a la dirección de las fibras en relación a la aplicación de la carga.

Según la norma JAS "Manufacturing Standard for Structural Laminated Veneer Lumber", Tabla N° 24, los valores de Resistencia al Esfuerzo Cortante deben ser superiores a los valores mínimos para ambas direcciones de uso. Dichos valores mínimos son para Uso Vertical (Edgewise) 3,43 MPa y para uso horizontal (Flatwise) 2,94 Mpa. La clasificación se realizó a partir de los valores medios obtenidos de Resistencia al Esfuerzo cortante.

Tabla N° 24. Clases de Resistencia al Esfuerzo Cortante según Uso.

Clase	Resistencia al E. Cortante (MPa)	
	Edgewise	Flatwise
	Uso Vertical	Uso Horizontal
65V- 55H	6,37	5,39
60V- 51H	5,88	5,00
55V- 47H	5,39	4,61
50V- 43H	4,90	4,22
45V- 38H	4,41	3,73
40V- 34H	3,92	3,33
35V- 30H	3,43	2,94

Los resultados de los tableros LVL cumplen los requerimientos mínimos de esta norma en relación la resistencia al Esfuerzo Cortante.

Cabe destacar que si bien todas las probetas de todos los tableros cumplen con los requisitos mínimos de la norma todos tienen una clasificación media a alta para la resistencia al Esfuerzo Cortante por lo que vemos que tienen buena calidad de encolado. Los valores obtenidos que presentan la mejor clasificación según esta norma son los de LVL de *E. grandis* de Rivera ya que se encuentran dentro de la clase superior de dicha clasificación.

9.6 Resultados de Vigas laminadas (GLULAM)

9.6.1 Densidad y contenido de humedad

En la siguiente Tabla N° 25 se presentan los resultados promedio de Contenido de Humedad y Densidad para Vigas Laminadas. Se evaluaron 2 probetas por Viga.

Tabla N° 25. Densidad y Contenido de Humedad de las Vigas laminadas según especie y muestreo.

Especie / Muestreo / Adhesivo	N° de Probetas	Contenido Humedad (%)	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	
			Media	Desv. std
<i>E.grandis</i> / Rivera / RESORCINOL	12	12,3	0,426	0,018
<i>E.grandis</i> / Rivera / ISOCIANATO	12	12,7	0,425	0,012
<i>E.grandis</i> / Paysandú / RESORCINOL	12	13,3	0,451	0,024
<i>E.grandis</i> / Paysandú / ISOCIANATO	12	13,4	0,452	0,018
<i>P.taeda</i> / Tacuarembó / ISOCIANATO	14	11,2	0,378	0,016
<i>P.taeda</i> / Paysandú / ISOCIANATO	14	11,6	0,396	0,020

Los valores de densidad al igual que en madera sólida muestran diferencias entre especies y muestreos siendo las Vigas de *E. grandis* más densas que las de *P. taeda* y entre las de *E. grandis* las del litoral más densas que las del Norte. En las de *P. taeda* no hay tanta diferencia entre muestreos. Especies. Los valores de contenido de humedad están dentro de 11-14 % siendo el requerimiento del proyecto que los mismos fueran inferiores a 15%.

9.6.2 Módulo de Elasticidad (MOE) y Módulo de Rotura (MOR)

A continuación se presentan los resultados obtenidos de MOE y MOR para las vigas laminadas. El módulo de elasticidad se estimó a partir de Métodos no destructivos y también se determinó mediante el ensayo de Flexión estática en 4 puntos en máquina Universal, donde además se determinó el Módulo de Rotura.

9.6.2.1 Estimación del MOE por métodos no destructivos

Previo al ensayo en Máquina Universal las Vigas Laminadas fueron evaluadas a través de Métodos No Destructivos para poder estimar el Módulo de Elasticidad. Los métodos seleccionados fueron FFT ANALYZER, FAKOPP y SYLVATEST. A su vez se calculó de forma teórica el MOE utilizando el valor individual de MOE de cada lámina y realizando el promedio de las 5 láminas que componen la viga y utilizando también el momento de Inercia. En las siguientes Tablas N° 26 y 27 se presentan dichos resultados.

Tabla N° 26. Estimación del MOE a partir de Métodos No Destructivos.

Estimación MOE a través de Métodos No Destructivos (MPa)							
Especie/Muestreo/ Adhesivo	N° de Vigas	FFT ANALYZER		FAKOPP		SYLVATEST	
		Media	Desv. std	Media	Desv. std	Media	Desv. std
<i>E.grandis</i> /Muestreo 1/ RESORCINOL	6	12976	183	12682	316	14794	323
<i>E.grandis</i> /Muestreo 1/ ISOCIANATO	6	13030	409	12448	336	14449	432
<i>E.grandis</i> /Muestreo 2/ RESORCINOL	6	13052	487	12846	281	14956	314
<i>E.grandis</i> /Muestreo 2/ ISOCIANATO	6	13110	233	12707	268	14806	361
<i>P.taeda</i> /Muestreo 3/ ISOCIANATO	7	6310	581	7114	438	7837	567
<i>P.taeda</i> /Muestreo 4/ ISOCIANATO	7	5636	157	6296	229	6910	243

Tabla N° 27. Estimación del MOE a partir de Cálculos teóricos.

Cálculos Teóricos (MPa)				
Especie/Muestreo/ Adhesivo	Promedio 5 láminas		Cálculo Teórico Momento de Inercia	
	Media	Desv. std	Media	Desv. std
<i>E.grandis</i> /Muestreo 1/ RESORCINOL	11820	153	13219	406
<i>E.grandis</i> /Muestreo 1/ ISOCIANATO	11971	301	13278	483
<i>E.grandis</i> /Muestreo 2/ RESORCINOL	12297	277	13209	381
<i>E.grandis</i> /Muestreo 2/ ISOCIANATO	12709	332	13634	408
<i>P.taeda</i> /Muestreo 3/ ISOCIANATO	5448	374	6382	325
<i>P.taeda</i> /Muestreo 4/ ISOCIANATO	4986	133	5770	253

9.6.2.2 Flexión estática (MOE y MOR) ensayo en Máquina Universal

En las siguiente Tabla N° 28 se presentan los resultados de MOE y MOR obtenidos para Vigas Laminadas según especie, muestreo y adhesivo utilizado luego del ensayo en máquina Universal.

Tabla N° 28 Resultados MOE y MOR para Vigas Laminadas.

Flexión estática (4 puntos) en Máquina Universal (MPa)						
Especie / Muestreo / Adhesivo	N° de Vigas	MOE		MOR		Clasificación según Norma JAS
		Media	Desv. std	Media	Desv. std	
<i>E.grandis</i> / Rivera / RESORCINOL	6	12446	357	58,7	6,6	(E135-F375) / (E120-F330)
<i>E.grandis</i> / Rivera / ISOCIANATO	6	12072	567	50,3	9,1	(E135-F375) / (E120-F330)
<i>E.grandis</i> / Paysandú / RESORCINOL	6	12706	376	58,5	8,8	(E135-F375) / (E120-F330)
<i>E.grandis</i> / Paysandú / ISOCIANATO	6	12918	711	61,8	14,0	(E135-F375) / (E120-F330)
<i>P.taeda</i> / Tacuarembó / ISOCIANATO	7	6732	355	30,8	5,5	(E75-F240) / (E65-F225)
<i>P.taeda</i> / Paysandú / ISOCIANATO	7	5770	389	34,1	9,3	<E65-F225

Observando la Tabla anterior se puede ver que los resultados de las Vigas de *E. grandis*, son superiores que las de *P. taeda* tanto en MOE como en MOR, y que las vigas que presentan la mejor performance, son las de *E.*

grandis del muestreo de Paysandú que están encoladas con Isocianato con un valor de 12918 MPa de MOE y 61,8 MPa de MOR.

Si comparamos los resultados según el sitio de muestreo vemos que en general las vigas elaboradas con madera del litoral del país presentan mejores resultados que las del norte para ambas especies.

No ocurre lo mismo comparando los dos adhesivos utilizados para encolar las vigas de *E. grandis* según el sitio de muestreo, ya que para Rivera las Vigas encoladas con Resorcinol presentan mejores resultados que las encoladas con Isocianato. Para el muestreo del litoral ocurre lo contrario.

En la siguiente Tabla N° 29 se presenta la Clasificación según la Norma JAS “Manufacturing Standard for structural Glued laminated timber”. La misma presenta los valores característicos de MOE y MOR para Vigas laminadas de composición simétrica.

Tabla N° 29. Clases según MOE Norma JAS“Manufacturing Standard for structural Glued laminated timber”.

Clases según MOR (kg/cm ²) Composición Simétrica	MOE (MPa)		MOR (MPa)
	Valor Medio	Valor Mínimo	
E170-F495	16672	13730	48,5
E150-F435	14711	12259	42,7
E135-F375	13239	11278	36,8
E120-F330	11768	9807	32,4
E105-F300	10297	8826	29,4
E95-F270	9317	7846	26,5
E85-F255	8336	6865	25,0
E75-F240	7355	6375	23,5
E65-F225	6375	5394	22,1

Observando la tabla anterior vemos que las Vigas de *E. grandis* presentan una clase media a alta para uso estructural según la Norma JAS y además los valores de MOR de las vigas son superiores a los de la clase más alta por lo que se puede decir que las vigas de *E. grandis* una buena performance según esta norma. No ocurre lo mismo para las vigas de *P. taeda* donde las misma presentan resultados que las coloca en las categorías más bajas.

A continuación se presentan los Gráficos N° 3, 4, 5, 6, 7 y 8, donde se comparan de los diferentes métodos No Destructivos para estimar el MOE con el resultado del ensayo en Máquina Universal.

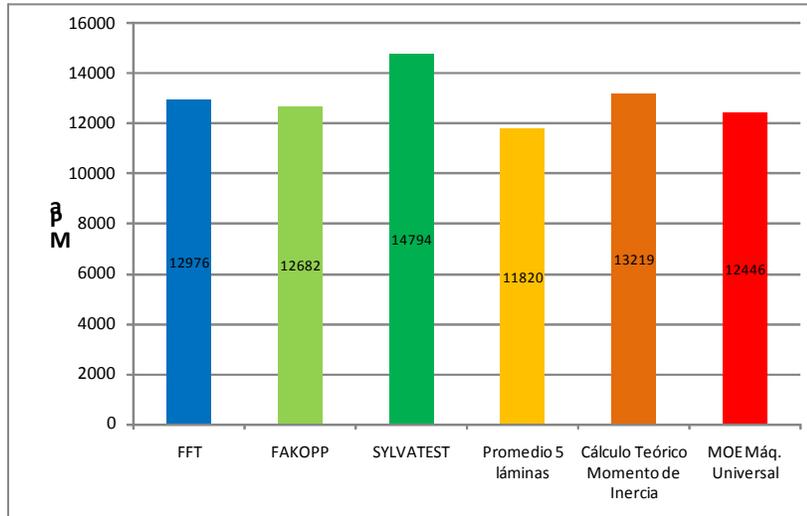


Grafico Nº 3. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal *Eucalyptus grandis* Muestreo 1 utilizando Resorcinol como adhesivo.

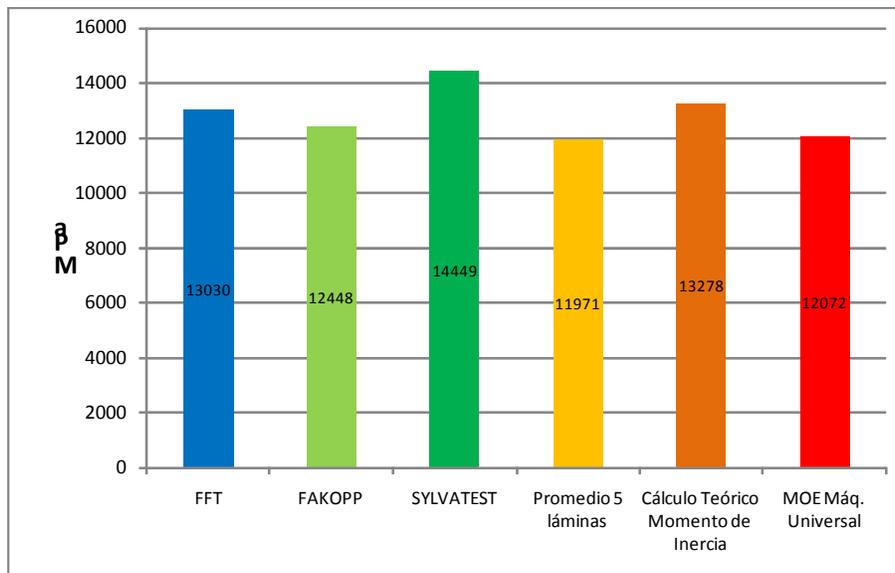


Grafico Nº 4. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal *Eucalyptus grandis* Muestreo 1 utilizando Isocianato como adhesivo.

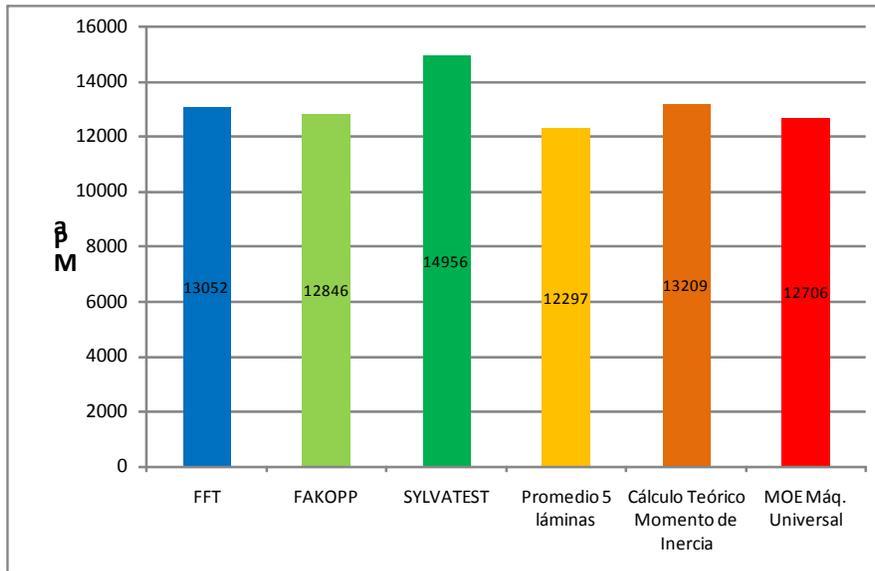


Grafico Nº 5. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal *Eucalyptus grandis* Muestreo 2 utilizando Resorcinol como adhesivo.

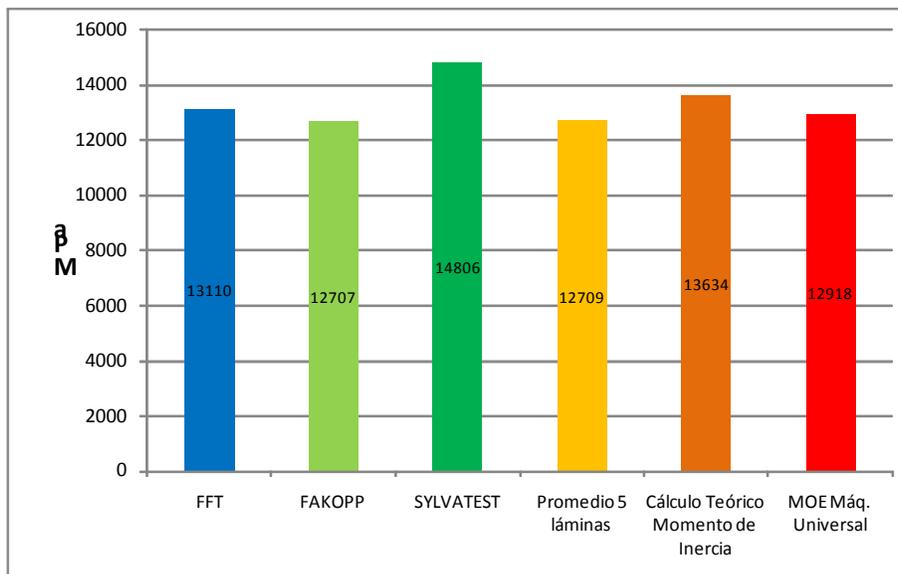


Grafico Nº 6. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal *Eucalyptus grandis* Muestreo 2 utilizando Isocianato como adhesivo.

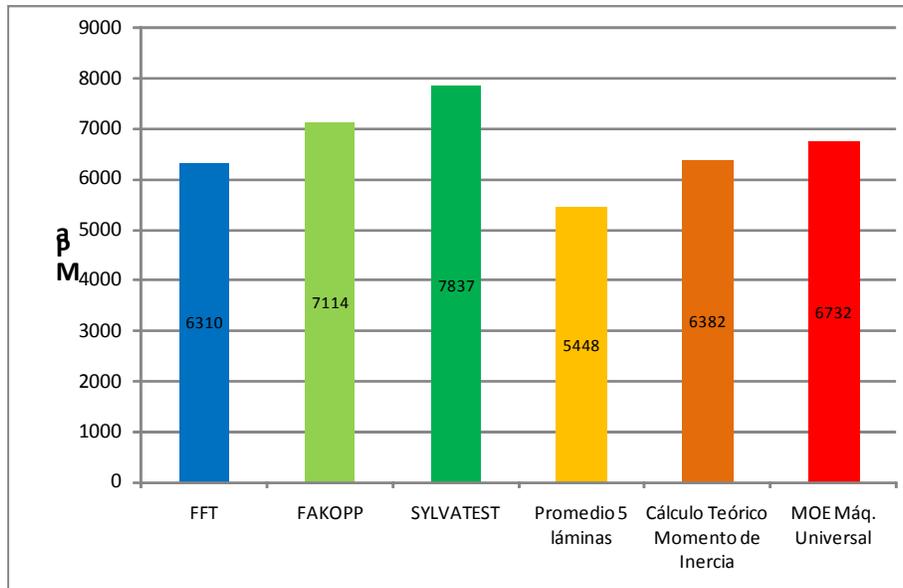


Grafico Nº 7. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal *Pinus taeda* Muestreo 3 utilizando Isocianato como adhesivo.

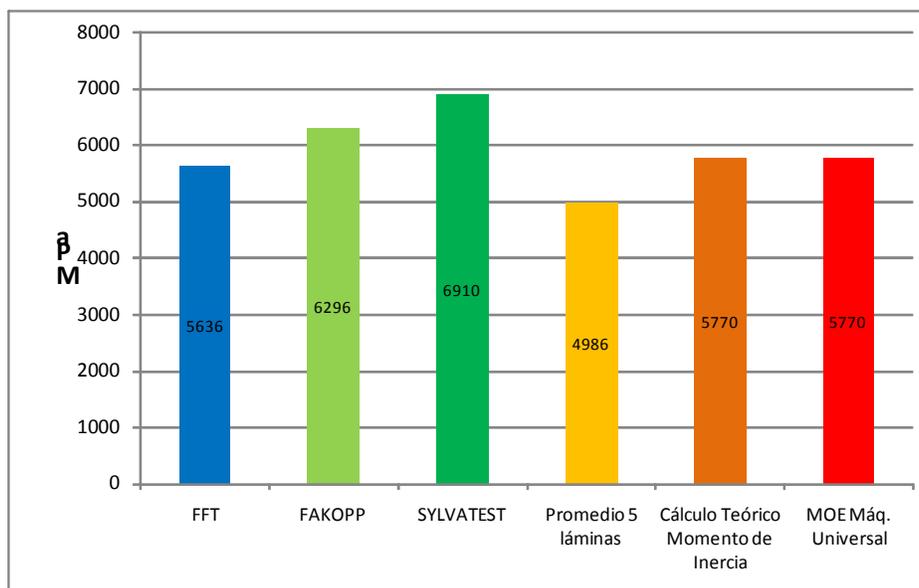


Grafico Nº 8. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal *Pinus taeda* Muestreo 4 utilizando Isocianato como adhesivo.

Observando los gráficos anteriores se puede observar que el Método No Destructivo SYLVATEST para todos los casos estudiados sobre estima los valores de MOE comparados con los de Máquina Universal, mientras que la

determinación a través del Promedio de las 5 láminas que componen la viga sub estima dicho valor.

Para las vigas de *Eucalyptus grandis* el método que mejor estima los valores de MOE es el FAKOPP, ya que es el que presenta las menores diferencias con los datos de Máquina Universal. Para las vigas de *Pinus taeda* el método no destructivo que mejor estima es el FFT ANALYZER.

9.6.3 Flexión estática (MOE y MOR) en 4 puntos de probetas con uniones Finger Joint

Se evaluó la calidad de las uniones Finger Joint a partir del ensayo de flexión estática. Las vigas elaboradas en el proyecto presentan uniones finger joint que están encoladas con PVA. Además de estas uniones se realizaron ensayos utilizando uniones con otros adhesivos como Resorcinol para *Eucalyptus grandis* e Isocianato para *E. grandis* y *Pinus taeda*. En la siguiente Tabla N° 30 se presentan los resultados de MOE y MOR para dichas uniones finger joint.

Tabla N° 30. Resultados de MOE y MOR para unión finger joint utilizando diferentes adhesivos.

Flexión estática (4 puntos) Finger Joint (MPa)					
Especie - Adhesivo	N° de Probetas	MOE		MOR	
		Media	Desv. std	Media	Desv. std
<i>E.grandis</i> - PVA	120	12404	1355	57,9	9,8
<i>E.grandis</i> - ISOCIANATO	30	12087	927	59,0	7,8
<i>E.grandis</i> - RESORCINOL	32	13144	1191	59,4	9,0
<i>P. taeda</i> – PVA	143	5373	1158	35,0	6,7
<i>P.taeda</i> - ISOCIANATO	36	5801	1083	33,4	7,4

Lo que se observa de la Tabla anterior es que los resultados no difieren notoriamente según el adhesivo utilizado para ambas especies. Se puede decir que si bien el adhesivo utilizado para encolar la unión finger joint es importante, intervienen otros factores como el número de dientes en la unión, la altura, el ancho y el ángulo de cada diente que le dan la resistencia a dicha unión.

9.6.4 Calidad de encolado

La evaluación de la calidad de encolado en Vigas laminadas se realizó a través de pruebas de Inmersión en agua a diferentes condiciones, donde se determinó el % de Delaminación de las uniones luego del tratamiento. También se determinó el Esfuerzo Cortante a través de un cizallamiento por compresión en la línea de encolado y se determinó el % de Falla en madera de dicha unión.

9.6.4.1 Delaminación

Para poder determinar el % de Delaminación de las uniones encoladas de las vigas laminadas se realizaron 2 tratamientos de Inmersión en agua a diferentes temperaturas. A continuación se presentan en las siguientes Tablas N° 31 y 32 los resultados obtenidos luego de dichos tratamientos. Se evaluaron 2 probetas por viga y por tratamiento.

Tabla N° 31. % Delaminación luego del Tratamiento de Inmersión en agua a 20 °C (24 horas).

Especie / Muestreo / Adhesivo	Nº de Vigas evaluadas	% Delaminación Primer Ciclo	% Delaminación Segundo Ciclo
<i>E.grandis</i> /Rivera / RESORCINOL	6	0,7	12,0
<i>E.grandis</i> /Rivera / ISOCIANATO	6	0,0	1,9
<i>E.grandis</i> /Paysandú / RESORCINOL	6	1,0	6,9
<i>E.grandis</i> / Paysandú / ISOCIANATO	6	0,0	8,2
<i>P.taeda</i> / Tacuarembó / ISOCIANATO	10	11,9	32,2
<i>P.taeda</i> / Paysandú / ISOCIANATO	10	26,7	34,5

Tabla N° 32. % Delaminación luego del Tratamiento de Inmersión en agua hirviendo (24 horas).

Especie / Muestreo / Adhesivo	Nº de Vigas evaluadas	% Delaminación Primer Ciclo	% Delaminación Segundo Ciclo
<i>E.grandis</i> /Rivera / RESORCINOL	6	13,5	19,3
<i>E.grandis</i> /Rivera / ISOCIANATO	6	0,8	1,6
<i>E.grandis</i> / Paysandú / RESORCINOL	6	3,8	10,0
<i>E.grandis</i> / Paysandú / ISOCIANATO	6	1,1	4,0
<i>P.taeda</i> / Tacuarembó / ISOCIANATO	10	30,9	38,0
<i>P.taeda</i> / Paysandú / ISOCIANATO	10	39,1	47,3

Observando ambas Tablas anteriores se puede ver que las Vigas de *Pinus taeda* que fueron encoladas con Isocianato son las que sufren más los tratamientos de inmersión presentando los valores más altos de Delaminación.

Si comparamos los resultados obtenidos en Vigas de *E. grandis* utilizando diferentes adhesivos vemos que las encoladas con Isocianato presentan mejores resultados que las encoladas con Resorcinol.

Esto se debe principalmente a la forma de elaboración de las vigas ya que las encoladas con Isocianato fueron elaboradas a nivel industrial y las encoladas con Resorcinol fueron elaboradas en laboratorio utilizando encolado y prensas manuales.

9.6.4.2 Esfuerzo cortante

En la siguiente Tabla N° 33 se presentan los resultados del Ensayo de Esfuerzo cortante sobre la línea de encolado y el % de Falla en Madera. Estos dos parámetros son importantes para evaluar la calidad de las uniones encoladas. El número de ensayos realizados por viga fue de 24 compresiones en la línea de encolado.

Tabla N° 33. Resultados de Esfuerzo Cortante y Falla en Madera para Vigas laminadas.

Especie	Adhesivo	Esfuerzo cortante (MPa)			Falla en Madera
		Promedio	Desv. Std	C.V (%)	(%)
<i>Eucalyptus grandis</i>	Resorcinol	3,5	0,49	14	80
	Isocianato	3,2	0,40	13	84
<i>Pinus taeda</i>	Isocianato	2,9	0,84	29	76

Los datos se presentan por especie y adhesivo utilizado y no por muestreo ya que no se observan diferencias entre sitios en relación a la Resistencia al esfuerzo cortante.

Se observa algo similar a lo que sucedió con los ensayos de Delaminación donde las uniones de las vigas de *Pinus taeda* presentan los valores más bajos tanto en Resistencia como en Falla en Madera, lo que implica que la unión encolada de este tipo es menos resistente que las uniones de *Eucalyptus grandis*.

Para las Vigas de *E. grandis* las Vigas encoladas con Resorcinol presentan mejores resultados en Resistencia aunque las encoladas con Isocianato presentan mejores resultados en Falla en Madera, aunque se puede decir que en líneas generales ambos resultados son similares.

9.7 Comparativo ente Productos de Ingeniería de la Madera y Madera sólida, mediante los resultados obtenidos de Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura.

En las siguientes tablas N° 34 y 35 se observan los valores promedio de MOE y MOR de los productos de ingeniería de la madera y se comparan con los valores de madera sólida para *Eucalyptus grandis* por muestreo. Para ambos muestreos los valores promedio de MOE y MOR de los productos son superiores a los obtenidos para madera sólida. Está diferencia es para LVL en promedio un 17 % superior en MOE y un 29% en el MOR. En vigas laminadas encoladas con Resorcinol la diferencia es de 13% en MOE y 15% en MOR y las encoladas con Isocianato la diferencia es de 12% en MOE y 9% en MOR.

Tabla N° 34. Comparación del MOE de productos de Ingeniería de la Madera y de madera sólida por muestreo para *E. grandis*.

MOE en flexión (MPa)		LVL	Vigas laminadas		Madera Sólida
			Resorcinol	Isocianato	
Muestreo 1 (Rivera)	Promedio	12778	12446	12072	11228
	Desv. Std	593	357	567	1874
	C.V (%)	5	3	5	17
Muestreo 2 (Paysandú)	Promedio	13266	12706	12918	11003
	Desv. Std	680	376	711	1581
	C.V (%)	5	3	6	14

Tabla N° 35. Comparación de MOR de productos de Ingeniería de la Madera y de madera sólida por muestreo para *E. grandis*.

MOR en flexión (MPa)		LVL	Vigas laminadas		Madera Sólida
			Resorcinol	Isocianato	
Muestreo 1 (Rivera)	Promedio	66,0	58,7	50,3	53,6
	Desv. Std	3,2	6,6	9,1	14,6
	C.V (%)	5	11	18	27
Muestreo 2 (Paysandú)	Promedio	65,9	58,5	61,8	49,0
	Desv. Std	6,2	8,8	14,0	14,2
	C.V (%)	9	15	23	29

Se puede observar en las dos tablas anteriores que los valores de coeficiente de variación que muestran las vigas laminadas y especialmente LVL

comparado con la madera sólida son significativamente más bajos. Esto habla de la homogeneidad de los productos de ingeniería de la madera, frente a la madera sólida debido principalmente a la eliminación de defectos en el proceso de producción, propiciando una baja variabilidad entre piezas y por ende la obtención de un producto con un comportamiento más predecible.

Similares características presentan los valores de MOE y MOR para *Pinus taeda*. En las tablas N° 36 y 37 se presentan dichos resultados. A diferencia de *Eucalyptus grandis* las vigas laminadas presentan valores superiores a las de LVL salvo para MOR del muestreo 3.

Tabla N° 36. Comparación de MOE de productos de Ingeniería de la Madera y de madera sólida por muestreo para *P. taeda*.

MOE en flexión (MPa)		LVL	Vigas laminadas	Madera Sólida
Muestreo 3 (Tacuarembó)	Promedio	6200	6732	5397
	Desv. Std	453	355	1336
	C.V (%)	7	5	25
Muestreo 4 (Paysandú)	Promedio	5141	5770	5017
	Desv. Std	625	389	952
	C.V (%)	12	7	19

Tabla N° 37. Comparación de MOR de productos de Ingeniería de la Madera y de madera sólida por muestreo para *P. taeda*.

MOR en flexión (MPa)		LVL	Vigas laminadas	Madera Sólida
Muestreo 3 (Tacuarembó)	Promedio	35,9	30,8	23,7
	Desv. Std	2,9	5,5	11,7
	C.V (%)	8	18	49
Muestreo 4 (Paysandú)	Promedio	32,1	34,1	30,0
	Desv. Std	4,5	9,3	14,4
	C.V (%)	14	27	48

En cuanto a los valores del coeficiente de variación si bien los productos muestran valores menores que la madera sólida, los mismos son más altos que para *Eucalyptus grandis* y por ende menos homogéneos comparando una especie con otra.

En los siguientes Gráficos N° 9 y 10 se muestran los valores promedio de MOE y MOR por producto y por especie. Se puede observar que los valores de *Eucalyptus grandis* son en promedio un 47 % superiores en MOE y un 54 %

superiores en MOR que Pinus taeda para las vigas laminadas, LVL y madera sólida.

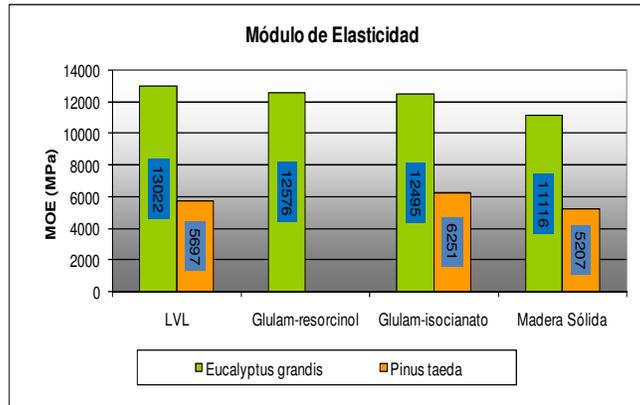


Gráfico N° 9. Módulo de Elasticidad promedio según producto y especie.

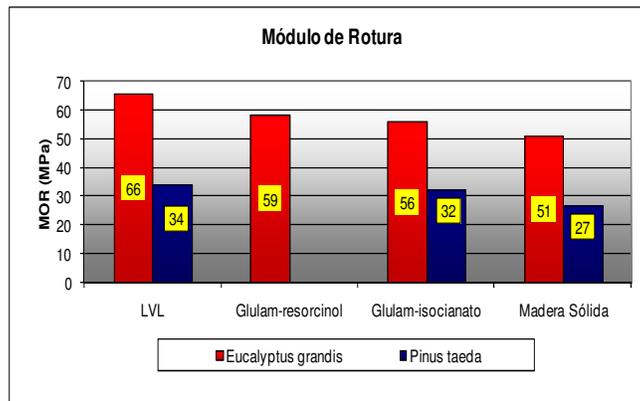


Gráfico N° 10. Módulo de Rotura promedio según producto y especie.

Si bien los valores de los Productos de Ingeniería de la madera son superiores a los de la madera sólida, hay que resaltar los valores de LVL de Eucalyptus grandis con 13022 MPa de MOE y 66 MPa de MOR.

También se presentan en las siguientes Tablas N° 38, 39 y 40 los resultados de resistencia mecánica de los productos de ingeniería de la madera de este proyecto, a los efectos de comparar los mismos con los obtenidos en trabajos anteriormente realizados por el Departamento de Proyectos Forestales del LATU,

Tabla N° 38 Comparación del MOE de LVL de este proyecto, con el de la nota técnica N° 3 del Departamento de Proyectos Forestales.

MOE en flexión (MPa)		LVL Proyecto PDT-LATU	LVL Nota Técnica N°3
<i>Eucalyptus grandis</i>	Promedio	13000	11200
<i>Pinus taeda</i>	Promedio	5700	4100

En el caso del LVL se pudo observar en la tabla N° 38, que los valores obtenidos en el proyecto que nos ocupa son superiores a los obtenidos e informados en la nota técnica N° 3 y es de resaltar que estos últimos fueron determinados en madera proveniente de árboles de turno final y que el adhesivo utilizado fue resorcinol.

Tabla N° 39. Comparación del MOE de las vigas laminadas de este proyecto, con el del Informe de Investigación N°10, 2002. Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales LATU-JICA.

MOE en flexión (MPa)		Vigas laminadas	
		Proyecto PDT-LATU	Informe N°10
<i>Eucalyptus grandis</i>	Promedio	12500	12000
<i>Pinus taeda</i>	Promedio	6200	8700

Al igual que en el LVL en las vigas laminadas y encoladas, existen diferencia en cuanto a las características del material utilizado entre los dos trabajos, Tabla N° 39. En *E. grandis* las diferencias de valores promedio de MOE no son significativas, a pesar de que la madera utilizada si tenía diferente edad, la empleada en el informe N° 10 provenía de un turno final, a diferencia de la de este proyecto que es de el primer raleo comercial.

En *P.taeda* la diferencia significativa entre los valores de MOE es debida a dos causas, la primera es la diferente proporción de madera juvenil, menor por la edad en la madera utilizada en el informe N° 10 que doblaba la de este proyecto. El segundo motivo que pudo influir en la diferencia entre ambos valores, fue el proceso de fabricación de las vigas laminadas, las de este proyecto fueron encoladas y prensadas en forma manual en instalaciones del LATU a diferencia de las del informe N° 10 cuyo proceso fue realizado en plata industrial.

Tabla N° 40. Comparación del MOR de las vigas laminadas de este proyecto, con el del Informe de Investigación N°10, 2002. Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales LATU-JICA.

MOR en flexión (MPa)		Vigas laminadas	
		PDT	Informe N°10
Eucalyptus grandis	Promedio	56	65
Pinus taeda	Promedio	32	45

En cuanto a los valores de MOR, Tabla N° 40, la diferencia tiene las mismas causas que se observaron en el MOE.

10. Conclusiones

1. Los productos de Ingeniería de la madera permiten un mejor aprovechamiento del recurso valorizando los raleos comerciales ya que se pueden fabricar productos con mayor valor agregado y para uso estructural especialmente en *Eucalyptus grandis*.
2. *Eucalyptus grandis* presenta mejores resultados que *Pinus taeda*, tanto en el aserrado como en el debobinado, debiéndose principalmente a que las trozas presentan menos conicidad y defectos, por lo que se obtiene un volumen de tablas y chapas mayor. Lo contrario sucede luego del proceso de secado donde los rendimientos de tablas y chapas secas son superiores en *P. taeda*. Esto último es debido principalmente a la mayor cantidad de defectos que presentan las tablas y las chapas de *E. grandis* luego del secado como rajaduras.
3. En la fabricación de LVL se obtiene un producto más denso en relación a las vigas laminadas y a las vigas de madera sólida que presentan densidades aparentes corrientes similares para ambas especies entre sí. Esto refleja un mejor resultado en las propiedades mecánicas (MOE y MOR).
4. Los valores promedio del ensayo de flexión estática en máquina universal muestran un mejor comportamiento en MOE y MOR de LVL y Vigas laminadas comparado con las vigas madera sólida para ambas especies estudiadas debido a la eliminación de defectos que ocurre al fabricar dichos productos.
5. Para madera proveniente de árboles de primeros raleos comerciales, se observó un mejor comportamiento de el *E. grandis* respecto al *P. taeda* en el MOE como en el MOR tanto en vigas laminadas, LVL y madera sólida.
6. No se observan grandes diferencias en MOE y MOR entre Vigas laminadas encoladas con Resorcinol que con Isocianato, aunque las diferencias se aprecian en la calidad de encolado donde las encoladas con Resorcinol presentan mejor desempeño en ambos ensayos.
7. Las vigas laminadas de *E. grandis* presenta mejores resultados de calidad de encolado con respecto a las vigas laminadas de *P. taeda*.
8. Existe una disminución de la variabilidad entre piezas en las propiedades estudiadas, especialmente en LVL, lo que permite tener un comportamiento más predecible del producto comparado con la madera sólida.

9. El LVL presenta en todos los casos, tanto para *E. grandis* como para *P. taeda* 0 % de delaminación, por lo que se puede decir que dicho producto presenta una excelente calidad de encolado, utilizando fenol formaldehído como adhesivo y en las condiciones en las que fue elaborado.

11. Bibliografía

- ASTM. 1998. D 198 – 98, Standard Test Method of static Test of lumber in structural sizes – Flexure.
- ASTM. 1999. D 5572 – 95, Standard Specification for Adhesives Used for Finger Joints in Nonstructural Lumber Products.
- Benites, L. 2003. Inspección visual, Densidad y Contenido de Humedad de Tableros Derivados de la Madera. Informe de Investigación N° 1, Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales, LATU-JICA (1998-2003), Montevideo, Uruguay.
- Benites, L. 2004. Características de Madera de Chapas Laminadas (LVL) de Plantaciones de rápido crecimiento del Uruguay. Nota Técnica N° 3, Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Montevideo, Uruguay.
- García, L; Guindeo A; Pereza, C; de Palacios P. 2002. La Madera y su Tecnología. AiTiM, Madrid, España.
- JAPANESE AGRICULTURAL STANDARD FOR GLUED LAMINATED TIMBER. 2003. JAS, SE-8, Japón.
- JAPANESE AGRICULTURAL STANDARD FOR STRUCTURAL GLUED LAMINATED TIMBER. 2000. JAS, SE-9, Japón.
- JAPANESE AGRICULTURAL STANDARD FOR LAMINATED VENEER LUMBER. 2000. JAS, SE-10, Japón.
- MANUFACTURING STANDARD FOR STRUCTURAL GLUED LAMINATED TIMBER. 2000. JAS, OE-4, Japón.
- MANUFACTURING STANDARD FOR STRUCTURAL LAMINATED VENEER LUMBER. 2000. JAS, OE-5, Japón.

- Ohta, S; de Castro, R; Pérez del Castillo, A. 2000. Ensayos de Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* por seis Métodos No Destructivos. Informe de Investigación N° 1, Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales, LATU-JICA (1998-2003), Montevideo, Uruguay.

- Pérez del Castillo, A; Benites, L. 2002. Propiedades Mecánicas y Resistencia de Uniones Encoladas de Vigas Laminadas. Informe de Investigación N° 10, Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales, LATU-JICA (1998-2003), Montevideo, Uruguay.

- Smulski, S. 1997. Engineered Wood Products “A guide for Specifiers, designers and users”. PSF Research Foundation, Madison, Wisconsin, USA.

- Soto, G.; Pincheira, V. 2001. Productos Reconstituidos a Base de Madera. Tomo I, Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, Talca, Chile.

Listado de Figuras, Gráficos y Tablas

Figuras

Figura N° 1. Ensayos no destructivos para estimar el MOE en árboles, Eucalyptus grandis en pie, equipos FAKOPP y SYLVATEST.....	7
Figura N° 2. Ensayo no destructivo para estimar la densidad aparente en árboles, E. grandis en pie, extracción de tarugo 12 mm de diámetro con extractor a nafta.	8
Figura N° 3. Ensayos no destructivo para estimar el MOE en trozas de P. taeda, en el monte (FAKOPP) y en el LATU antes del aserrado (FAKOPP, FF ANALYZER).	8
Figura N° 4. Esquema de obtención de tablas de E. grandis y P. taeda según su ubicación en el radio.....	9
Figura N° 5. Aserrado de trozas de P. taeda y E. grandis.	10
Figura N° 6. Secado de vigas para ensayos mecánicos y fabricación de GLULAM, de P. taeda y E. Grandis.....	10
Figura N° 7. Vigas de E. grandis y P. taeda elaboradas en el Proyecto.....	14
Figura N° 8. Piezas para elaboración de Vigas Laminadas.....	18
Figura N° 9. Perfiles Finger joint saliendo de la Fresadora.	19
Figura N° 10. Elaboración de las láminas en la industria.	19
Figura N° 11. Flexión estática por pesas en láminas finger joint.	20
Figura N° 12. Esquema de diseño de la ubicación de las láminas que van a formar la viga según MOE.....	21
Figura N° 13. Encolado de láminas utilizando encoladora mecánica y utilizando rodillo manual.....	22
Figura N° 14. Prensa Hidráulica de alta frecuencia.....	24
Figura N° 15. Prensado de Vigas laminadas en LATU.....	24
Figura N° 16. Cepillado de Vigas en LATU.	25
Figura N° 17. Tablero de Madera Microlaminada LVL.....	26
Figura N° 18. Extracción de Rodaja para Densidad y determinación del MOE utilizando el FAKOPP.....	28
Figura N° 19. Cámaras de Vaporizado.....	29
Figura N° 20. Alimentador de Trozas.	30
Figura N° 21. Torno automático con troza fijada previo al debobinado.	30
Figura N° 22. Chapa obtenida luego del debobinado.....	31
Figura N° 23. Secadero continuo de chapas.	32
Figura N° 24. Máquina Clasificadora según Contenido de Humedad.	33

Figura N° 25. Clasificación Visual de Chapas.	34
Figura N° 26. Encolado de chapas en Encoladora de rodillos.....	34
Figura N° 27. Composición de las chapas dentro del tablero según la clasificación de las mismas.	35
Figura N° 28. Prensa hidráulica para prensado en frío.	36
Figura N° 29. Prensa de Platos Calientes.	36
Figura N° 30. Extracción de Probetas del baño termostatzado.	39
Figura N° 31. Probeta de LVL siendo sometida al ensayo de Esfuerzo cortante en Máquina Universal.....	40
Figura N° 32. Elaboración de Vigas LVL, encolado y prensado.....	41
Figura N° 33. Ensayo de Flexión estática en vigas y pequeñas probetas LVL.	42
Figura N° 34. Viga laminada siendo evaluada a través del FFT ANALYZER... ..	43
Figura N° 35. Viga laminada siendo evaluada a través del FAKOPP.....	44
Figura N° 36. Viga laminada siendo ensayada en Máquina Universal.	44
Figura N° 37. Esquema Flexión estática 4 puntos.....	45
Figura N° 38. Esquema y foto de probetas de Esfuerzo cortante en la línea de encolado.....	45
Figura N° 39. Ensayo de Esfuerzo cortante en Vigas Laminadas.	46
Figura N° 40. Falla en Madera en probetas de Esfuerzo Cortante.....	46
Figura N° 41. Probetas dentro del Baño luego de la Inmersión y las mismas siendo secadas en estufa.....	47
Figura N° 42. Determinación del % de Delaminación.....	48
Figura N° 43. Probeta de Finger Joint sometida al ensayo de Flexión estática.	48
Figura N° 44. Esquema del ensayo de Flexión Estática Finger Joint.	49

Gráficos

Gráfico N° 1. Resultados MOE para Vigas de LVL, pequeñas probetas Edgewise y pequeñas probetas Flatwise de LVL.	61
Gráfico N° 2. Resultados MOR para Vigas de LVL, pequeñas probetas Edgewise y pequeñas probetas Flatwise de LVL.	61
Gráfico N° 3. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal Eucalyptus grandis Muestreo 1 utilizando Resorcinol como adhesivo.	67

Grafico Nº 4. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal Eucalyptus grandis Muestreo 1 utilizando Isocianato como adhesivo.	67
Grafico Nº 5. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal Eucalyptus grandis Muestreo 2 utilizando Resorcinol como adhesivo.	68
Grafico Nº 6. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal Eucalyptus grandis Muestreo 2 utilizando Isocianato como adhesivo.	68
Grafico Nº 7. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal Pinus taeda Muestreo 3 utilizando Isocianato como adhesivo.	69
Grafico Nº 8. Comparativo entre MOE Métodos No Destructivos vs. Máquina Universal Pinus taeda Muestreo 4 utilizando Isocianato como adhesivo.	69
Grafica Nº 9. Módulo de Elasticidad promedio según producto y especie.	74
Gráfico Nº 10. Módulo de Rotura promedio según producto y especie.	74

Tablas

Tabla Nº 1: Muestreos, especies, cantidad de árboles y sitios seleccionados ...	3
Tabla Nº 2: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 50 árboles de Eucalyptus grandis seleccionados (muestreo inicial).	3
Tabla Nº 3: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 50 árboles de Pinus taeda seleccionados (muestreo inicial).	4
Tabla Nº 4: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 20 árboles de Eucalyptus grandis seleccionados para aserrado.	4
Tabla Nº 5: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 20 árboles de Pinus taeda seleccionados para aserrado.	4
Tabla Nº 6: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 10 árboles de Eucalyptus grandis seleccionados para el debobinado.	4
Tabla Nº 7: Diámetros promedio a altura de pecho y Densidad Aparente Verde de los 10 árboles de Pinus taeda seleccionados para el debobinado.	5
Tabla Nº 8. Resultados ensayos no destructivos y destructivos para E. grandis Muestreo 1 de Rivera.	50
Tabla Nº 9. Resultados ensayos no destructivos y destructivos para E. grandis Muestreo 2 de Paysandú.	51
Tabla Nº 10. Resultados ensayos no destructivos y destructivos para P. taeda Muestreo 3 de Tacuarembó.	52
Tabla Nº 11. Resultados ensayos no destructivos y destructivos para P. taeda Muestreo 4 de Paysandú.	53

Tabla N° 12. Resultados Tablas ensayadas por métodos no destructivos y en Máquina Universal para determinar MOE y MOR para E. grandis Muestreo 1 – Rivera.	54
Tabla N° 13. Resultados Tablas ensayadas por métodos no destructivos y en Máquina Universal para determinar MOE y MOR para E. grandis Muestreo 2 – Paysandú.	54
Tabla N° 14. Resultados Tablas ensayadas por métodos no destructivos y en Máquina Universal para determinar MOE y MOR para P. taeda Muestreo 3 – Tacuarembó.	55
Tabla N° 15. Resultados Tablas ensayadas por métodos no destructivos y en Máquina Universal para determinar MOE y MOR para P. taeda Muestreo 4 – Paysandú.	55
Tabla N° 16. Rendimiento de Tablas Verdes y Secas en relación al volumen de trozas para ambas especies y muestreos realizados.	56
Tabla N° 17. Rendimiento de Debobinado de Trozas por especie.	57
Tabla N° 18 Densidad y Contenido de Humedad de LVL según especie y muestreo.	58
Tabla N° 19 Resultados Promedio de MOE y MOR para Vigas de LVL según especie y muestreo.	59
Tabla N° 20. Grados de Vigas LVL en base a MOE y MOR según Norma JAS.	59
Tabla N° 21. Resultados de MOE y MOR de pequeñas probetas de LVL según especie, muestreo y dirección del ensayo.	60
Tabla N° 22. Grados según MOE y MOR según Norma JAS para LVL pequeñas probetas.	60
Tabla N° 23. Resistencia al Esfuerzo Cortante en LVL según especie, muestreo y dirección de ensayo.	62
Tabla N° 24. Clases de Resistencia al Esfuerzo Cortante según Uso.	63
Tabla N° 25. Densidad y Contenido de Humedad de las Vigas laminadas según especie y muestreo.	63
Tabla N° 26. Estimación del MOE a partir de Métodos No Destructivos.	64
Tabla N° 27. Estimación del MOE a partir de Cálculos teóricos.	65
Tabla N° 28 Resultados MOE y MOR para Vigas Laminadas.	65
Tabla N° 29. Clases según MOE Norma JAS“Manufacturing Standard for structural Glued laminated timber”.	66
Tabla N° 30. Resultados de MOE y MOR para unión finger joint utilizando diferentes adhesivos.	70

Tabla N° 31. % Delaminación luego del Tratamiento de Inmersión en agua a 20 °C (24 horas).	71
Tabla N° 32. % Delaminación luego del Tratamiento de Inmersión en agua hirviendo (24 horas).	71
Tabla N° 33. Resultados de Esfuerzo Cortante y Falla en Madera para Vigas laminadas.	72
Tabla N° 34. Comparación del MOE de productos de Ingeniería de la Madera y de madera sólida por muestreo para E. grandis.....	73
Tabla N° 35. Comparación de MOR de productos de Ingeniería de la Madera y de madera sólida por muestreo para E. grandis.....	73
Tabla N° 36. Comparación de MOE de productos de Ingeniería de la Madera y de madera sólida por muestreo para P. taeda.	73
Tabla N° 37. Comparación de MOR de productos de Ingeniería de la Madera y de madera sólida por muestreo para P. taeda.	74
Tabla N°38 Comparación del MOE de LVL de este proyecto, con el de la nota técnica N° 3 del Departamento de Proyectos Forestales.	75
Tabla N° 39. Comparación del MOE de las vigas laminadas de este proyecto, con el del Informe de Investigación N°10, 2002. Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales LATU-JICA.....	75
Tabla N° 40. Comparación del MOR de las vigas laminadas de este proyecto, con el del Informe de Investigación N°10, 2002. Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales LATU-JICA.....	76