



0006773

PINO OREGÓN

(Pseudotsuga menziessi

(Mirb) Franco):

PROCESOS INDUSTRIALES Y

APLICACIONES

DE LA MADERA



GOBIERNO DE CHILE
CORFO



INFOR
Instituto Forestal

GOBIERNO DE CHILE
FDI – CORFO

INSTITUTO FORESTAL

INFOR
447
1a. ed.
C-1

**PINO OREGÓN (*Pseudotsuga menziessi* (Mirb) Franco):
PROCESOS INDUSTRIALES Y APLICACIONES DE LA MADERA**

DICIEMBRE 2003

EDITORES Marcela Guzmán F.
 Claudia Vergara C.
 Rodrigo Briones V.
 Gonzalo Hernández C.
 Alonso Gómez L.

La presente publicación fue generada en el marco del Proyecto FDI/CORFO-INFOR: "Nuevos productos y mercados que permitan la incorporación del Pino oregón al sistema productivo nacional". La información contenida se desprende de varios estudios tecnológicos desarrollados a escala de laboratorio e industrial, contemplando experiencias de secado, trabajabilidad, encolabilidad, revestimientos superficiales, reacción al fuego, confección de tableros OSB y vigas laminadas.

**Pino oregón (*Pseudotsuga Menziessi* (Mirb) Franco):
Procesos industriales y aplicaciones de la madera**

Registro de Propiedad Intelectual N° 136.023
Concepción, Chile. 2003
I.S.B.N. 956-8274-11-1

Financiamiento de la presente Edición:
Fondo de Desarrollo e Innovación, FDI a través del
Proyecto "Nuevos productos y mercados que permitan la
incorporación del Pino oregón al sistema productivo
nacional".

Primera Edición: Diciembre 2003
Diseño de Portada: Ricardo Oyarzún O.
Diagramación e Impresión: Impresos Valverde S.A.

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

-PRÓLOGO

Desde sus inicios en el año 1962, el Instituto Forestal ha desarrollado diferentes investigaciones orientadas a la selección de especies forestales apropiadas para la repoblación bajo las variadas condiciones de clima y suelo existentes en las distintas regiones del país.

Dentro de las especies forestales estudiadas, el pino oregón ha presentado un buen comportamiento a las condiciones de suelo y clima en algunas regiones del sur de Chile, transformándose en la quinta especie en importancia comercial para Chile.

Los principales productos que se obtienen de su elaboración son la madera aserrada, forros y muebles, los cuales son comercializados mayoritariamente en el mercado nacional. Al mercado externo se destina como producto principal la madera aserrada seca, que es utilizada en la confección de elementos de alto valor agregado, tales como vigas laminadas estructurales.

En el presente trabajo el Instituto Forestal proporciona la información técnica que permite procesar y confeccionar valiosos componentes con madera de la referida especie. Se espera que esta información sea la base para futuros desarrollos, mejorando de esta forma sus posibilidades en el mercado nacional y el de exportación.

El financiamiento para generar esta publicación fue obtenido del proyecto FDI/CORFO "Nuevos productos y mercados que permitan la incorporación del pino oregón al sistema productivo nacional", desarrollado por el Instituto Forestal entre los años 2001 y 2003.

CONTENIDO

CAPITULO I	ANTECEDENTES GENERALES DE LA ESPECIE Claudia Vergara C.
CAPITULO II	SECADO DE LA MADERA: ENSAYOS DE LABORATORIO Paula Ruiz T. Reinaldo Sánchez A.
CAPITULO III	SECADO DE LA MADERA: VALIDACIÓN INDUSTRIAL Alonso Gómez L.
CAPITULO IV	TRABAJABILIDAD DE LA MADERA Marcela Guzmán F. William Muñoz T.
CAPITULO V	ENCOLABILIDAD DE LA MADERA Marcela Guzmán F. William Muñoz T.
CAPITULO VI	FABRICACIÓN DE ELEMENTOS LAMINADOS Rodrigo Briones V. Gonzalo Hernández C.
CAPITULO VII	PROPIEDADES DE REACCIÓN AL FUEGO Rodrigo Briones V. Gonzalo Hernández C.
CAPITULO VIII	REVESTIMIENTOS Claudia Vergara C. Luis Machuca S.
CAPITULO IX	FABRICACIÓN DE TABLEROS OSB Rodrigo Briones V. Gonzalo Hernández C.

INDICE GENERAL

CAPITULO I	ANTECEDENTES GENERALES DE LA ESPECIE	
	1.1 Ubicación geográfica	9
	1.2 Descripción del árbol	9
	1.3 Propiedades físicas y mecánicas	11
	1.4 Aspectos Tecnológicos	13
	1.5 Bibliografía	16
CAPITULO II	SECADO DE LA MADERA: ENSAYOS DE LABORATORIO	
	2.1 Metodología	18
	2.2 Resultados	21
	2.3 Conclusiones	27
	2.4 Bibliografía	27
CAPITULO III	SECADO DE LA MADERA: VALIDACIÓN INDUSTRIAL	
	3.1 Metodología	28
	3.2 Resultados	32
	3.3 Conclusiones	34
	3.4 Bibliografía	35
CAPITULO IV	TRABAJABILIDAD DE LA MADERA	
	4.1 Metodología	36
	4.2 Resultados	40
	4.3 Conclusiones	45
	4.4 Bibliografía	46
CAPITULO V	ENCOLABILIDAD DE LA MADERA	
	5.1 Metodología	47
	5.2 Resultados	53
	5.3 Conclusiones	55
	5.4 Bibliografía	56

CAPITULO VI	FABRICACIÓN DE ELEMENTOS LAMINADOS	
	6.1 Metodología	57
	6.2 Resultados	61
	6.3 Conclusiones	69
	6.4 Bibliografía	70
CAPITULO VII	PROPIEDADES DE REACCIÓN AL FUEGO	
	7.1 Metodología	72
	7.2 Resultados	74
	7.3 Conclusiones	77
	7.4 Bibliografía	77
CAPITULO VIII	REVESTIMIENTOS	
	8.1 Metodología	79
	8.2 Resultados	81
	8.3 Conclusiones	88
	8.4 Bibliografía	89
CAPITULO IX	FABRICACIÓN DE TABLEROS OSB	
	9.1 Metodología	90
	9.2 Resultados	93
	9.3 Conclusiones	94
	9.4 Bibliografía	95

CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES DE LA ESPECIE

1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El pino oregón es una especie conífera nativa de Norteamérica, cuya clasificación botánica la sitúa en la familia de las Pinaceae y en el género *Pseudotsuga*. Su nombre científico es *Pseudotsuga menziesii*, y es conocido vulgarmente como pino oregón, abeto de Douglas, Douglas spruce y Douglas fir, entre otros.

La distribución natural de esta especie se sitúa en la cercanía de la costa de Estados Unidos hasta Sierra Nevada, específicamente al este de las montañas cascadas en Washington y Oregon, al oeste del rango costero en la Columbia Británica, y oeste de Sierra Nevada en el Norte de California (Fowells, 1965; INFOR, 1986; Serra, 1987; Kannegiesser, 1988; cit. por INFOR-CONAF, 1998).

En Europa el pino oregón es el árbol introducido más exitoso, con rodales vigorosos en 24 países (Toval, et al., 1993). Francia tenía, en 1993, 220.000 hectáreas plantadas, Alemania 80.000 e Inglaterra 46.000 hectáreas. Al año 2020, Francia alcanzará las 500.000 hectáreas y Alemania planea plantar un 20% de su superficie forestal con pino oregón.

Ha sido plantado también con éxito en Holanda, España y Polonia. En Nueva Zelandia, el pino oregón comprende cerca del 5% de los recursos forestales exóticos, con un volumen de explotación de 350.000 m³/año y con una producción de madera aserrada de 175.000 m³ (Cown, 1992). En este país tiene buena reputación como madera estructural firme y estable, alcanzado crecimientos medios de 17,5 a 24,5 m³/ha/año, constituyéndose, junto con el pino radiata, en las especies exóticas de mayor rendimiento (Bucarey, 1968).

En Chile, su buen comportamiento en las áreas donde ha sido plantado, lo muestran como una opción para diferentes zonas (Droppelmann, 1986), destacándose las Provincias de Arauco (Curanilahue) y Osorno, donde el crecimiento de las plantas de pino oregón es mayor que las de *Pinus radiata* D. Don (INFOR-CONAF, 1998).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁRBOL

El pino oregón es un árbol de gran tamaño que, en su lugar de origen, puede alcanzar 50 a 90 m de altura y diámetros de 2 a 4,5 m. Su fuste es recto, cilíndrico, ligeramente cónico, con una copa piramidal, con ramas horizontales dispuestas en verticilos.

Se reproduce por semillas que germinan fácilmente, incluso provocando la regeneración espontánea en los bosques cuando las condiciones de luz y humedad son adecuadas (Hoffmann, 1983).

Las hojas son acículas lineales, planas y obtusas en el ápice, o agudas en los brotes primarios, en las que son blandas y flexibles; de color verde-amarillento, verde oscuro o verde azuladas, de 1,5 a 5,5 cm de longitud, por 1,5 cm de ancho (INFOR-CONAF, 1998).

¹ Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Instituto Forestal – Unidad Industrias

En árboles jóvenes la corteza es de color gris, delgada, suave y cubierta por bolsas de resina. En los árboles maduros se torna café-rojizo, suave, esponjosa, gruesa, agrietada, escamosa y con un espesor que puede llegar a 10 cm ó más.

Burschel y Huss (1987) mencionan que el pino oregón requiere un alto contenido de humedad en el aire y media humedad en el suelo, es resistente a las sequías, tiene un alto riesgo de daño a las heladas tardías, tolerancias medias a la sombra y muy poco tolerante a la competencia de raíces (INFOR-CONAF, 1998).

• **Requerimientos de suelo y clima**

En Chile, el pino oregón crece en suelos de textura arenosa, arcillosa, franca y arcillas derivadas de ceniza volcánica. Exige suelos profundos, bien drenados y ricos en humus, bien ventilados. Se desarrolla bien en suelos con pH entre 5 y 5,5; pero no prospera en suelos con mal drenaje o capas impermeables cercanas a la superficie. En la parte norte, crece mejor en las laderas de exposición sur; no así en la parte sur, donde la exposición norte le es más favorable, lo mismo que los fondos de valle.

La variedad más importante es la denominada *menziessi* *vaz menziessi* y crece favorablemente en zonas costeras cuyo clima marítimo es bastante homogéneo y los veranos secos. Las temperaturas medias varían entre los 7 y 12 °C con temperatura máxima absoluta de 45 °C y mínima absoluta de -35 °C. A mayores altitudes, soporta acumulaciones de nieve de hasta 3 m de profundidad. Precipitaciones anuales de más o menos 1.200 mm son adecuadas para las necesidades de crecimiento de la especie.

• **Crecimiento**

En Chile, el crecimiento en altura culmina alrededor de los 25 años y su aumento en volumen tiende a estabilizarse a edades cercanas a los 40 años. Los incrementos medios anuales de volumen van desde 11 a 18,9 m³/ha/año y el crecimiento medio anual en altura alcanza entre 0,32 y 1,14 m³/año, mientras que los incrementos medios anuales de DAP van de 0,44 a 1,66 cm/año (Chile Forestal 252, 1997).

• **Anatomía**

La madera de pino oregón presenta una angosta albura de color claro, usualmente de menos de 5 cm de ancho; esto es especialmente válido en rodales naturales viejos, pero en material de segundo crecimiento, puede ser hasta de 7,5 cm de ancho. Esta consideración adquiere relevancia ya que en general, el mercado hace distinción entre los árboles provenientes de bosques antiguos o de segundo crecimiento, siendo mejor considerados los primeros (Cown, 1992).

El color del duramen va desde amarillento hasta café rojizo, observándose una diferencia notoria de color entre la madera temprana y tardía, siendo esta última más oscura, definiéndose bandas muy marcadas. Estas diferencias de color dan como resultados un patrón de grano distintivo cuando un tronco es aserrado o debobinado.

Traqueidas longitudinales: Poseen engrosamiento espiralado, delgado y seriado, acentuado en la madera de primavera. Grandes puntuaciones areoladas uniseriadas sobre la pared

radial de las traqueidas de madera de primavera. Pequeñas puntuaciones areoladas sobre las paredes radiales y tangenciales de las traqueidas de madera de verano (Jaquiot, 1955).

Radios leñosos: Uniseriados (excepto aquellos que contienen un canal resinífero transversal). La altura máxima rara vez supera las 20 células de altura. Son heterogéneos, con células parenquimáticas de paredes delgadas. 2 a 6 puntuaciones piceoides pequeñas por campo de cruce. Paredes transversales y tangenciales con abundantes puntuaciones. Traqueidas transversales en filas marginales poco numerosas, de paredes delgadas y uniformes, con numerosas puntuaciones areoladas pequeñas (Jaquiot, 1955).

Parénquimas longitudinal: Ocasionalmente en la madera de verano, limitado a la zona de crecimiento (Jaquiot, 1955).

Canales resiníferos: Con células epiteliales de paredes gruesas. Longitudinales, poco numerosos, diámetro medio (40 – 140 μ), localizado en su mayoría en la madera de verano, solitarios o en grupos poco numerosos. Transversales, muy finos, contenidos en ciertos radios leñosos (Jaquiot, 1955).

1.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Según antecedentes del Servicio Forestal de los Estados Unidos, publicados en el documento *Softwoods of North America* (Alden, 1997), la densidad de la madera de pino oregón crecido en cuatro diferentes zonas de Estados Unidos corresponde a la mostrada en tabla 1.

Tabla 1: Densidad de la madera de pino oregón según localización en Estados Unidos

Localización	Contenido de humedad	Densidad (kg/m ³)
Costa	Verde (referencia 37%)	610
	12%	540
Oeste Interior	Verde (referencia 34%)	610
	12%	500
Norte Interior	Verde (referencia 30%)	560
	12%	480
Sur Interior	Verde (referencia 30%)	430
	12%	460

Fuente: Alden (1997)

En un estudio de las características físicas y mecánicas de esta especie creciendo en Chile, en tres rodales en la provincia de Valdivia (X Región), se determinaron valores de densidad básica en promedio de 418 kg/m³ (Díaz-Vaz y Cuevas, 1987).

De acuerdo al documento *Softwoods of North America* (Alden, 1997), las propiedades mecánicas de la madera de pino oregón proveniente de cuatro diferentes zonas de Estados Unidos son las indicadas en la tabla 2.

Tabla 2: Propiedades mecánicas de la madera de pino oregón según localización en Estados Unidos

Localidad	Propiedad	Verde	Seco
Costa	MOE*	10,8 GPa	13,4 GPa
	MOR**	53,1 MPa	85,5 MPa
	Compresión Paralela	26,1 MPa	49,8 MPa
	Compresión Perpendicular	2,62 MPa	5,52 MPa
	Dureza	2.220 N	3.160 N
	Cizalle Paralelo	6,20 MPa	7,79 MPa
Oeste Interior	MOE	10,4 GPa	12,6 GPa
	MOR	53,1 MPa	86,9 MPa
	Compresión Paralela	26,7 MPa	51,2 MPa
	Compresión Perpendicular	2,90 MPa	5,24 MPa
	Dureza	2.270 N	2.940 N
	Cizalle Paralelo	6,48 MPa	8,89 MPa
Norte Interior	MOE	9,72 GPa	12,3 GPa
	MOR	51,0 MPa	90,3 MPa
	Compresión Paralela	23,9 MPa	47,6 MPa
	Compresión Perpendicular	2,48 MPa	5,31 MPa
	Dureza	1.870 N	2.670 N
	Cizalle Paralelo	6,55 MPa	9,65 MPa
Sur Interior	MOE	8,00 GPa	10,3 GPa
	MOR	46,9 MPa	82,0 MPa
	Compresión Paralela	21,4 MPa	43,0 MPa
	Compresión Perpendicular	2,34 MPa	5,10 MPa
	Dureza	1.600 N	2.270 N
	Cizalle Paralelo	6,55 MPa	10,4 MPa

*: Módulo de elasticidad. **: Módulo de ruptura

Fuente: Alden (1997)

Antecedentes aportados por Department of the Environment. Inglaterra, 1977, señalan que las propiedades mecánicas de la madera de pino oregón, proveniente de árboles crecidos en la costa del Pacífico, en general, presentan mayor densidad, dureza y resistencia que la madera proveniente de las áreas montañosas.

En estudios de propiedades mecánicas de la madera de pino oregón crecida en Chile, realizados con material proveniente de Nueva Imperial y Villarrica (IX Región), se concluye que en general, las propiedades mecánicas del pino oregón de Nueva Imperial resultan menores que las determinadas en árboles provenientes de Villarrica. Al comparar las propiedades mecánicas de los árboles crecidos en la costa de Estados Unidos y las dos procedencias nacionales, éstas resultan similares a las de árboles provenientes de Villarrica, siendo ambas mejores que los individuos de Nueva Imperial. El pino oregón nativo de zonas comprendidas entre costa y montañas, tiene mejores propiedades que el de Nueva Imperial, pero son muy similares, y en algunas solicitaciones es menor a aquellas obtenidas para el pino oregón proveniente de la zona de Villarrica.

Respecto de los que provienen de la zona montañosa de Estados Unidos, sus propiedades mecánicas son levemente mejores que las obtenidas de árboles de Nueva Imperial, pero menores que las resultantes de los de Villarrica. De este estudio se concluye que los árboles

que crecen en Villarrica tendrían, en general, propiedades mecánicas similares a las de la especie en su distribución natural, lo cual es un buen indicio de las potencialidades de la especie, siempre que crezca en un sitio adecuado. Por otra parte, si se comparan las propiedades mecánicas del pino oregón de la IX región con las del Pino radiata de similar edad, se puede concluir que las propiedades del primero son superiores, a pesar de que el peso específico del pino radiata es mayor (Pérez, V.A., 1982).

En la tabla 3 se presentan las propiedades mecánicas de procedencias Chilenas de pino oregón.

Tabla 3: Propiedades mecánicas de la madera de pino oregón (Contenido de Humedad 12%)¹

Localización			Unidad	Nueva Imperial	Villarrica	IX Región
Peso Específico			kg/m ³	371	445	408
Flexión	Modulo de Ruptura		kg/cm ²	678	894	792
	Modulo de Elasticidad		kg/cm ²	84.100	102.800	94.000
Tenacidad	Tangencial	Resistencia Máxima	N cm	2.543	3.283	2.928
	Radial	Resistencia Máxima	N cm	1.590	1.868	1.734
Compresión	Paralela	Tensión al Lim. Prop.	kg/cm ²	198	284	241
		Tensión Máxima	kg/cm ²	329	433	381
	Normal	Tensión al Lim. Prop.	kg/cm ²	52	71	62
		Tensión Máxima	kg/cm ²	98	131	115
Tracción normal	Tangencial	Tensión de Rotura	kg/cm ²	17	18	18
	Radial	Tensión de Rotura	kg/cm ²	13	11	12
Dureza	Normal	Carga Máxima	kg	237	302	270
	Paralela	Carga Máxima	kg	368	480	424
Cizalle	Tangencial	Tensión de Rotura	kg/cm ²	81	80	80
	Radial	Tensión de Rotura	kg/cm ²	84	86	85
Clivaje	Tangencial	Tensión de Rotura	kg/cm	27	26	26
	Radial	Tensión de Rotura	kg/cm	23	27	25

Fuente: INFOR-CONAF, 1998

1.4 ASPECTOS TECNOLÓGICOS

Secado

La madera de pino oregón es de secado rápido, sin tendencia a formar muchas grietas ni curvaturas, pero los nudos tienden a partirse y soltarse (Department of the Environment, Inglaterra, 1977).

Diferentes estudios señalan que los defectos más importantes de secado asociados a la madera son: torcedura, encurvadura y arqueadura, además de las grietas en caras y puntas. Para reducir los alabeos se recomienda la utilización de pesos de aproximadamente 1.800 kg/cm² (Juacida *et.al.*, 1986).

¹ Secado al aire

Los rangos de temperatura propuestos para secado a alta temperatura fluctúan entre 110 y 113 °C para el bulbo seco y 85 a 88 °C para el bulbo húmedo, con las cuales el proceso de secar madera de 25 mm de espesor hasta un contenido de humedad final de 8 a 10%, tendría una duración cercana a las 28 horas, incluido un período de calentamiento y otro de enfriamiento. Sin embargo, el uso de una mayor temperatura incrementa la intensidad de los defectos respecto al secado convencional y provoca una coloración más oscura de la superficie de la madera (Juacida *et.al.*, 1986). La tabla 4 indica algunos valores de contracción de la madera en Norteamérica.

Tabla 4: Contracción según localización en Norteamérica

Localización	Porcentaje de Contracción (verde a anhidro) (%)		
	Tangencial	Radial	Volumétrico
Costa	7,6	4,8	12,4
Oeste Interior	6,9	3,8	10,7
Norte Interior	7,5	4,8	11,8

Fuente: Alden (1997)

En madera crecida en Chile, la contracción promedio en las direcciones tangencial, radial y longitudinal es de 7,5%; 4,8% y 0,1%, respectivamente. En tanto que la contracción volumétrica promedio resulta ser 12,1% (Díaz-Vaz y Cuevas, 1987).

Durabilidad natural y permeabilidad

El pino oregón crecido en los Estados Unidos es calificado como una especie moderadamente resistente a la pudrición. La madera de pino oregón de California se califica refractaria al tratamiento con preservantes. La madera de árboles que crecen en las montañas estadounidenses es más difícil de impregnar que las provenientes de la Costa y, probablemente, pertenecen a la clase de las maderas extremadamente resistentes a la impregnación (Department of the Environment. Inglaterra, 1977).

En cuanto a la resistencia al ataque de insectos, se señala que, en oportunidades, los rollizos son atacados por el escarabajo ambrosía (taladrador), siendo más frecuente el daño por el escarabajo de cuerno largo. Ocasionalmente se ha registrado daño por el escarabajo joya, *Buprestis aurulenta* (Department of the Environment. Inglaterra, 1977).

Los resultados obtenidos al estudiar la permeabilidad del pino oregón creciendo en la zona de Valdivia, indican que esta especie presenta escasa permeabilidad al ser sometida a impregnación con sales hidrosolubles (CCA). Es así como, los valores obtenidos son incluso menores que los determinados para Tapa, Ulmo, Olivillo y Coigüe (Schneider, 1984).

Trabajabilidad

Los antecedentes sobre las propiedades de trabajabilidad del pino oregón de los Estados Unidos, señalan que es una especie fácilmente trabajable a mano o con máquinas; sin embargo, presenta cierta tendencia al rasgado. Cuando la madera se corta a lo largo de la fibra, generalmente se obtiene una buena terminación si se emplean herramientas y condiciones técnicas adecuadas (Department of the Environment. Inglaterra, 1977).

A nivel nacional, existe un absoluto desconocimiento respecto de las variables técnicas involucradas en los procesos de cepillado, lijado, torneado, moldurado, y taladrado, aspectos

relevantes que deben ser considerados en proyectos que incluyen la fabricación de productos para exportación.

Aserrio, chapas y tableros

En Norteamérica la mayoría de los tableros contrachapados y chapas son producidos con pino oregón. La mayor concentración de plantas elaboradoras de este tipo de productos, se ubican en la costa Pacífico de Canadá y Estados Unidos (Departament of the Environment, Inglaterra, 1977). En un estudio realizado por Wolff (1989), se prepararon tableros de partículas de uso exterior con pino oregón de 12 años proveniente de raleos. Al ser ensayados en esfuerzos de flexión y tracción, estos tableros presentaron características de resistencia mucho mayores a los exigidos por la Norma DIN 68763.

En un estudio realizado con trozas de pino oregón provenientes del norte de Valdivia, se estudiaron dos variables del proceso de debobinado (calentamiento de las trozas y tasa de compresión), evaluando principalmente los defectos superficiales de las chapas. Se observó que el defecto de rugosidad en las chapas de pino oregón tiende a disminuir a medida que aumenta la temperatura, mientras que el defecto de pelusidad se acentúa con la temperatura a partir de los 50 a 70 °C, para llegar a ser notorio a los 90 °C. Respecto al arrancamiento de las fibras, se notó un leve aumento con la temperatura, manteniéndose constante en caso de utilizar una tasa de compresión de 16%. Al considerar los defectos precedentes en conjunto, se determina que las condiciones adecuadas para minimizarlos son una temperatura de calentamiento de 50 a 70 °C (Devlieger, *et al.*, 1986).

Recubrimientos

La madera de pino oregón Norteamericana se puede teñir satisfactoriamente. Cuando se toman cuidados normales para prevenir la fibra levantada, se obtienen buenos resultados en los tratamientos de acabado. Esta madera puede ser satisfactoriamente encolada (Departament of the Environment, Inglaterra, 1977).

No se han realizado experiencias para evaluar el comportamiento del pino oregón crecido en Chile, tanto en su comportamiento frente a los tratamientos de acabado como su comportamiento en las uniones encoladas.

Utilización

Siendo una de las maderas más conocidas en el mundo, es empleada para más propósitos que cualquier otra madera de Norteamérica. Es comúnmente empleada como madera aserrada y tableros contrachapados, en edificios y construcciones. Otros importantes usos son como madera estructural, pilotes, durmientes para ferrocarril, puentes, estacas para minas, crucetas, marcos, puertas y ventanas, pisos, muebles, chapas y terciados, terminaciones de interiores, cajones, envases, tonelería, madera laminada y para pulpa kraft. A veces, es usada en postes y cuarterones, y en construcción de botes y barcos (INFOR-CONAF, 1998).

El pino oregón que crece en Nueva Zelanda es adecuado para producir postes de transmisión tratados, resultando de mejor calidad que los de pino radiata, así como postes provenientes de los raleos. En general, de buenos rodales se obtiene madera aserrable de buena calidad y, muchas veces, de mejor forma que la de pino radiata. Estudios realizados

en este país han mostrado que más de un 60% del material es apto para uso estructural, lo cual justifica principalmente la forestación con esta especie (INFOR-CONAF, 1998).

Las astillas de pino oregón son usadas en plantas de celulosa o para la formación de tableros reconstituidos de fibra. Dado su color más oscuro, el pino oregón es usado como material al interior de los tableros, dejando afuera maderas más claras como la de pino radiata. Además, es una importante especie para la producción de celulosa en la costa de Norteamérica, principalmente usando material de desechos de aserraderos. Es muy común mezclar la pulpa de pino oregón con la de otras especies, para aumentar la resistencia del papel (INFOR-CONAF, 1998).

1.5 BIBLIOGRAFÍA

Alden, H. A. 1997. Softwoods of North America. Madison, USA. USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory. General Technical Report. FPL-GTR N° 102. 151p.

Bucarey, B. 1968. El género *Pseudotsuga*. Publicación Científica 12 de la Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 12 p.

Burschel, P.; Huss, J. 1987. Grundriss des Waldbaus. Ein Leitfaden für Studium und Praxis. Editorial Paul Parey. Hamburg, Alemania. 352 p.

Cown, J. 1992. New Zealand Radiata Pine and Douglas-fir. Suitability for Processing. FRI Bulletin 168. Forest Research Institute. Rotorua, Nueva Zelanda. 74 p.

Department of the Environment, 1977. A Handbook of Softwoods. Her majesty's stationery office. Inglaterra.

Chile Forestal (252): 12-17. Ficha Forestal: pino oregón. 1997.

Devlieger S., F.; Cuevas, H.; Inzunza, I. 1986. Efecto de las variables de debobinado en pino oregón y ciprés lusitano. Bosque (Chile) 07(2): 115-120

Díaz-Vaz O., J.; Cuevas, H.R. 1987. Características físicas y mecánicas de *Pseudotsuga menziesii* en: IX Conferencia Interamericana sobre Tecnología de Materiales. Santiago, Chile. 9-12/11/1981]. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. v.2 pp.711-714

Droppelmann F., J. 1986. Evaluación de un ensayo de procedencias de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (mirb) Franco) de 17 años de edad (Fundo Las Palmas, Valdivia). Tesis para optar al grado de Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 58p.

Hall, M.; White, J. 1998. Maderas del Sur de Chile: árboles, aplicaciones, procesos. Santiago, Chile. Instituto de Educación Rural, Servicio Alemán de Corporación Social Técnica. 92p.

Hoffmann J., A. 1983. El árbol urbano en Chile. Santiago, Chile. Fund. Claudio Gay. 253p.

INFOR-CONAF, 1998. Monografía de Pino oregón: *Pseudotsuga menziesii*. Santiago, Chile. 143p.

- Instituto Forestal. 2001. La industria del aserrío 1999-2000. Santiago, Chile. INFOR. Boletín Estadístico N° 84. 145p.
- Instituto Forestal. 1998. Exportaciones Forestales Chilenas (enero-diciembre 1997). Santiago, Chile. INFOR. Boletín Estadístico N° 57. 154p.
- Instituto Forestal. 1999. Exportaciones Forestales Chilenas (enero-diciembre 1998). Santiago, Chile. INFOR. Boletín Estadístico N° 66. 160p.
- Instituto Forestal. 2000. Exportaciones Forestales Chilenas (enero-diciembre 1999). Santiago, Chile. INFOR. Boletín Estadístico N° 72. 168p.
- Instituto Forestal. 2001. Exportaciones Forestales Chilenas (enero-diciembre 2000). Santiago, Chile. INFOR. Boletín Estadístico N° 77. 163p.
- Instituto Forestal. 2002. Boletín de Precios Forestales. N° 92, Santiago, Chile. INFOR. 18p.
- Instituto Forestal. 2002. Estadísticas Forestales 2001. Santiago, Chile. INFOR Boletín Estadístico N° 84. 145p.
- Jaquiot, C. 1955. Atlas d'Anatomie des bois de conifères. Institut National du Bois. Paris, France.
- Juacida P., R.; Ramirez, J.; Inzunza, I. 1986. Antecedentes sobre secado artificial de pino oregón. Bosque (Chile) 07(2): 103-113
- Pérez G., V. A. 1982. Propiedades mecánicas asociadas del pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*) crecido en Chile. Santiago, Chile. INFOR. División Industrias. Informe Técnico N° 85. 17p.
- Ramirez C., J.D. 1984. Comportamiento de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (mirb) franco) frente al secado artificial. Tesis para optar al grado de Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 87p.
- Sanhueza S., A. 1999. Estudio potencialidad de especie y sitios para una diversificación forestal: nuevas opciones productivas. Chile Forestal (272): 12-17
- Schneider A., C. E. 1984. Estudio de permeabilidad en madera de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (mirb.) franco) y ciprés (*Cupressus lusitanica* mill) crecido en la zona de Valdivia. Tesis para optar al grado de Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 48p.
- Toval, G.; Vega, G.; Puerto, G.; Jenkinson, L. 1993. Screening Douglas-fir for rapid early growth in Common-Garden. Test in Spain. USDA Forest Service. Pacific Southwest Research Station. General Technical Report PSW-GTR-146. 43p.
- Wolff L., J.M. 1989. Utilización de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (mirb.) Franco) en la fabricación de tableros de partículas de uso externo. Tesis para optar al grado de Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 63p.

CAPITULO II: SECADO DE LA MADERA: ENSAYOS DE LABORATORIO

La producción de madera aserrada de pino oregón el año 2001 fue de 34.483 m³ (INFOR, 2001), cuyo principal mercado fue el sector de construcción. Para los próximos años, las estimaciones indican un aumento de la producción de madera aserrada de esta especie debido al incremento de la capacidad de producción de los principales aserraderos que procesan esta madera; por lo que se hace necesario establecer nuevos usos y productos que permitan aumentar la rentabilidad del negocio.

En la búsqueda de aumentar el valor agregado de la madera, se hace necesario avanzar en la cadena del negocio, generando más que productos intermedios, productos finales. Sin duda, obtener madera de buena calidad después del proceso de secado constituye una etapa fundamental de este objetivo. Es por esto, que la investigación desarrollada pretende optimizar programas de secado para la madera en estudio.

2.1 METODOLOGÍA

Para desarrollar esta investigación se utilizaron 16 m³ de madera proveniente de un raleo comercial realizado a una plantación de 40 años, ubicada en el Fundo Voipir, camino a Racún, Comuna de Villarrica, IX región. La madera utilizada proviene de un bosque con densidad de plantación correspondiente a 280 árboles/hectárea y un DAP promedio de 31,5 cm.

Una vez obtenido el material de raleo, las trozas fueron aserradas obteniéndose piezas tangenciales y radiales en dos espesores (27 y 54 mm); con ancho y largo de 100 y 1.000 mm, respectivamente.

El diseño experimental consistió en seis ensayos a escala de laboratorio (tres por cada espesor). El primer ensayo correspondió a un programa predeterminado (ver tablas 1 y 2); el segundo y tercer ensayos corresponden a la optimización del primero y segundo, respectivamente.

Las cargas de cada ensayo fueron completadas con 70 piezas para la madera de 27 mm de espesor y con 58 piezas para la madera de 54 mm. En todos los casos, las cargas se completaron con un 50% de piezas por cada tipo de corte, las cuales fueron previamente selladas en sus extremos con el fin de simular el comportamiento de piezas de mayor longitud, en el sentido de asegurar un flujo transversal de la humedad.

¹ Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Laboratorio de Secado-DITTES, Universidad del Bío-Bío

² Ingeniero Civil Mecánico, Depto. de Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío-Bío

Tabla 1: Programa de secado experimental, ensayo 1: espesor 27 mm

Etapas	Temperatura (°C)		CHE(%)	Tiempo (h)
	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
Calentamiento	55	55		5
Verde - 28%	55	49	12	
28% - 13%	60	51	9	
Acondicionado	90	90		6

Velocidad del aire: 3 m/min; CHE: Contenido de humedad de equilibrio.

Tabla 2: Programa de secado experimental, ensayo 1: espesor 54 mm

Etapas	Temperatura (°C)		CHE(%)	Tiempo (h)
	Bulbo seco	Bulbo húmedo		
Calentamiento	50	50		5
Verde - 38%	55	46	15	
30% - 24%	53	47	12	
24% - 20%	55	48	11	
20% - 9%	57	49	10	
Acondicionado	90	90		2

Velocidad del aire: 3 m/min; CHE: Contenido de humedad de equilibrio.

Antes de comenzar con cada programa se determinó para todas las piezas el contenido de humedad inicial y densidad básica, de acuerdo a los procedimientos indicados por las normas chilenas: NCh 176/1 Of84 - Parte 1 (INN, 1984) y NCh 176/2 Of86 (INN, 1986). Posteriormente, para la conducción de los programas de secado se emplearon cuatro muestras testigos (dos piezas por tipo de corte), las que fueron pesadas diariamente.

2.1.1 Determinaciones realizadas para evaluar la calidad del secado

• Humedad de la madera y gradiente de humedad

Al finalizar el proceso de secado, a cada pieza de madera que conformó la carga se le determinó la humedad y el gradiente de humedad, éste último medido como la diferencia de humedad entre el centro y la superficie de cada pieza. La Tabla 3 señala el grado de calidad que se asigna a cada carga en función del gradiente de humedad obtenido.

Tabla 3: Variación permitida para el gradiente de humedad

Calidad	Máxima desviación del valor medio
S (Estándar)	± 4,0% - sin límites
C (Secado calidad)	± 3,0%
E (Exclusivo)	± 2,0%

Fuente: Commission of the European Communities, 1994

• Presencia de grietas

En general, las grietas cualquiera sea su condición (internas, superficiales y/o extremas), se evaluaron de acuerdo a la presencia o ausencia de éstas en la madera. La Tabla 4 muestra los diferentes niveles de calidad, en función del porcentaje de agrietamiento admisible.

Tabla 4: Grados de agrietamiento (interno, superficial, extremos)

Calidad	Agrietamiento admisible (%)
S (Estándar)	Mayor al 10% de la carga
C (Secado de calidad)	2 al 10% de la carga
E (Exclusivo)	Menor al 2% de la carga

Fuente: Commission of the European Communities, 1994

• Deformaciones

Previo al secado, a cada pieza de madera se le controlaron las deformaciones que pudiera presentar, proceso que se volvió a repetir una vez alcanzado el contenido de humedad objetivo. Los alabeos evaluados fueron la acanaladura, torcedura, arqueadura y encorvadura. Los valores máximos admisibles para cada uno de estos defectos se presentan en las Tablas 5 y 6.

La obtención de los valores máximos admisibles para cada uno de los alabeos se efectuó a partir de ajustes regresionales. Este análisis se realizó debido a que los valores indicados en la Norma Chilena 993 Of72 (INN, 1972), Procedimiento y Criterios de Evaluación para Clasificación, solamente se refieren a espesores y largos que difieren a los utilizados en los ensayos aplicados en este estudio.

Inicialmente, para cada tipo de alabeo a evaluar, se ajustaron curvas del tipo multiplicativo para los valores de deformación y largo indicados en la NCh 993. El ejercicio anterior se realizó para los espesores de 25 y 38 mm. Posteriormente, con la ayuda de las ecuaciones previamente definidas, se procedió a determinar la deformación para un largo de 1.000 mm. Estos valores permiten, a través de una interpolación, definir la deformación para una pieza de 30 mm de espesor.

Tabla 5. Nivel de tensiones admisibles, espesor 27 mm

Deformación	Niveles de clasificación (mm)			
	Sin defecto	Leve	Moderado	Severo
Acanaladura	0	$0 \leq x \leq 2,1$	$2,1 < x \leq 4,2$	$> 4,2$
Torcedura	0	$0 < x \leq 2,6$	$2,6 < x \leq 4,7$	$> 7,3$
Arqueadura	0	$0 < x \leq 2,5$	$2,5 < x \leq 4,8$	$> 4,8$
Encorvadura	0	$0 < x \leq 1,0$	$1,0 < x \leq 1,6$	$> 1,6$

Tabla 6. Nivel de tensiones admisibles, espesor 54 mm

Deformación	Niveles de clasificación (mm)			
	Sin defecto	Leve	Moderado	Severo
Acanaladura	0	$0 \leq x \leq 2,1$	$2,1 < x \leq 4,2$	$> 4,2$
Torcedura	0	$0 < x \leq 0,01$	$0,01 < x \leq 0,76$	$> 0,76$
Arqueadura	0	$0 < x \leq 0,5$	$0,5 < x \leq 1,4$	$> 1,4$
Encorvadura	0	$0 < x \leq 1,0$	$1,0 < x \leq 1,7$	$> 1,7$

• Contracción

El porcentaje de contracción de cada muestra se determinó a través de la diferencia de dimensiones iniciales y finales, de acuerdo a lo descrito en la Norma Chilena NCh 176/3 Of84 (INN, 1984).

2.2 RESULTADOS

La tabla 7 presenta los resultados de las evaluaciones realizadas al ensayo 1, ejecutado con madera de 27 mm de espesor. En ella se observa para todas las determinaciones, que la madera presentó un nivel de calidad "exclusivo". La única determinación que arrojó un valor diferente a 0% correspondió al gradiente de humedad, que alcanzó un 0,4%, valor está muy por debajo del indicado por el estándar ($\pm 2,0\%$).

Tabla 7: Resultados evaluaciones ensayo 1: espesor 27 mm

Parámetro	Radial	Tangencial
Humedad inicial (%)	68	82
Densidad básica (kg/m ³)	401	389
Humedad final promedio (%)	14	13
Gradiente humedad final promedio	E (0,4%)	E (0,4%)
Grietas internas	E (0%)	E (0%)
Grietas superficiales	E (0%)	E (0%)
Grietas en extremos	E (0%)	E (0%)
Contracción (%)		
Radial	1,1	0,5
Tangencial	1,4	2,0
Tiempo de secado (h)	114 (4,75 días)	

S: Estándar; C: Calidad; E: Exclusivo.

Sobre la base de los resultados obtenidos en este ensayo se generó el programa de secado 2, ejecutado con las siguientes condiciones:

Tabla 8: Programa de secado experimental, ensayo 2: espesor 27 mm

Ensayo	Etapa	Temperatura (°C)		CHE(%)	Tiempo (h)
		Bulbo seco	Bulbo húmedo		
2	Calentamiento	55	55		5
	Verde - 28%	60	51	9,1	
	28% - 10%	65	55	8,5	
	Acondicionado	90	90		3

Velocidad del aire: 3 m/min; CHE: Contenido de humedad de equilibrio.

Básicamente, las diferencias respecto del ensayo 1 se refieren al aumento de las temperaturas (bulbo seco y húmedo) en las etapas de secado (verde a 28% y 28 a 10%) y a una disminución del tiempo de acondicionado.

Los resultados obtenidos en este segundo experimento fueron la base que permitió definir el último de los programas a ensayar (ver tabla 9). A diferencia del programa anterior, en este se incorpora una etapa adicional, lo que permite una disminución de la temperatura de inicio y del tiempo de acondicionado.

Tabla 9: Programa de secado experimental, ensayo 3: espesor 27 mm

Ensayo	Etapa	Temperatura (°C)		CHE(%)	Tiempo (h)
		Bulbo seco	Bulbo húmedo		
3	Calentamiento	55	55		5
	Verde - 25%	56	50	12	
	25% - 14%	58	50	10	
	14% - 10%	60	50	8,7	
	Acondicionado	90	90		2

Velocidad del aire: 1,5 m/min; CHE: Contenido de humedad de equilibrio

La tabla 10 presenta los resultados obtenidos con los programas de secado optimizados. Se observa que en ambos ensayos la madera alcanzó un nivel "exclusivo" en todos los parámetros evaluados. Al igual que en el ensayo inicial, solamente el gradiente de humedad presentó valores diferentes a 0%; sin embargo, estos valores se encuentran por debajo del estándar para el nivel alcanzado.

Tabla 10: Resultados evaluaciones en ensayos optimizados: espesor 27 mm

Parámetro	Ensayo 2		Ensayo 3	
	Radial	Tangencial	Radial	Tangencial
Humedad inicial (%)	72	80	75	64
Densidad básica (kg/m ³)	388	413	382	396
Humedad final promedio (%)	11	10	10	10
Gradiente humedad final promedio	E (-0,6%)	E (0,3%)	E (0,3%)	E (0,1%)
Grietas internas	E (0%)	E (0%)	E (0%)	E (0%)
Grietas superficiales	E (0%)	E (0%)	E (0%)	E (0%)
Grietas en extremos	E (0%)	E (0%)	E (0%)	E (0%)
Contracción (%)				
Radial	2,2	2,5	3,0	2,6
Tangencial	4,0	4,2	3,7	4,2
Tiempo de secado (h)	94; 3,9 días		89; 3,7 días	

Al comparar entre ensayos se observa que todos ellos satisfacen las condiciones del nivel de calidad "exclusivo"; sin embargo, en el ensayo 3 se logró una disminución del tiempo de secado de 25 horas.

La tabla 11 indica para los diferentes alabeos el porcentaje de piezas clasificadas por nivel de defecto; observándose en todos los ensayos que un gran número de piezas no presentó acanaladura ni encorvadura. La torcedura y arqueadura se presentaron en porcentajes menores, clasificando en niveles "leves" y "moderados".

Tabla 11: Porcentaje de piezas con defectos por nivel y tipo de corte

Defecto	Nivel	Corte	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Acanaladura	S/defecto	Radial	100%	100%	100%
		Tangencial	100%	94%	80%
	Leve	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	6%	20%
	Moderado	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	-	-
	Severo	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	-	-
Torcedura	S/defecto	Radial	97%	77%	57%
		Tangencial	91%	88%	71%
	Leve	Radial	3%	17%	17%
		Tangencial	6%	6%	23%
	Moderado	Radial	-	6%	17%
		Tangencial	3%	3%	3%
	Severo	Radial	-	-	8%
		Tangencial	-	3%	3%
Arqueadura	S/defecto	Radial	69%	77%	57%
		Tangencial	74%	85%	63%
	Leve	Radial	23%	6%	26%
		Tangencial	17%	6%	20%
	Moderado	Radial	8%	17%	17%
		Tangencial	9%	9%	17%
	Severo	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	-	-
Encorvadura	S/defecto	Radial	100%	80%	83%
		Tangencial	100%	100%	100%
	Leve	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	-	-
	Moderado	Radial	-	17%	3%
		Tangencial	-	-	-
	Severo	Radial	-	-	14%
		Tangencial	-	-	-

La tabla 12 presenta los resultados obtenidos en la evaluación del ensayo 1, ejecutado con madera de 54 mm de espesor. Se observa que en todas las evaluaciones realizadas la madera alcanzó niveles de 0%; alcanzando una calidad "exclusiva".

Tabla 12: Resultados evaluaciones ensayo 1: espesor 54 mm

Parámetro	Ensayo 1	
	Radial	Tangencial
Humedad inicial (%)	63	50
Densidad básica (kg/m ³)	405	380
Humedad final promedio (%)	10	8
Gradiente humedad final promedio	C (2,7)	E (1,6)
Grietas internas	E (0%)	E (0%)
Grietas superficiales	E (0%)	E (0%)
Grietas en extremos	E (0%)	E (0%)
Contracción (%)		
Radial	2,7	2,1
Tangencial	3,6	3,6
Tiempo de secado (h)	139; 5,8 días	

S: Estándar; C: Calidad; E : Exclusivo

Las tablas 13 y 14 presentan las condiciones de los programas 2 y 3; que fueron optimizados de acuerdo a los resultados obtenidos en ensayos anteriores. En el ensayo 2 se disminuyó el número de etapas intermedias, aumentando la temperatura de inicio del secado. En el ensayo 3, en tanto, se mantuvieron las condiciones del ensayo predeterminado, salvo por el aumento de temperatura registrado al comienzo, una vez que finaliza el calentamiento.

Tabla 13: Programa de secado experimental, ensayo 2: espesor 54 mm

Ensayo	Etapa	Temperatura (°C)		CHE(%)	Tiempo (h)
		Bulbo seco	Bulbo húmedo		
2	Calentamiento	50	50		5
	Verde – 25%	56	50	12	
	25% - 18%	58	50	10	
	18% - 14%	60	50	18,7	
	Acondicionado	90	90		2

Velocidad del aire: 3 m/min; CHE: Contenido de humedad de equilibrio.

Tabla 14: Programa de secado experimental, ensayo 3: espesor 54 mm

Ensayo	Etapa	Temperatura (°C)		CHE(%)	Tiempo (h)
		Bulbo seco	Bulbo húmedo		
3	Calentamiento	50	50		5
	Verde – 38%	56	50	12	
	30% - 24%	58	50	10	
	24% - 20%	60	50	8,7	
	20% - 9%	62	50	7,5	
	Acondicionado	90	90		2

Velocidad del aire: 1,5 m/min; CHE: Contenido de humedad de equilibrio.

Los resultados obtenidos en estos ensayos se presentan en las tablas 15 y 16.

Tabla 15: Resultados evaluaciones ensayos optimizados: madera de 54 mm

Parámetro	Ensayo 2		Ensayo 3	
	Radial	Tangencial	Radial	Tangencial
Humedad inicial (%)	62	53	59	51
Densidad básica (kg/m ³)	409	406	404	398
Humedad final promedio (%)	15	14	11	10
Gradiente humedad final promedio	E (1,8)	E (1,0)	E (1,6)	E (1,7)
Grietas internas	E (0%)	E (0%)	E (0%)	E (0%)
Grietas superficiales	E (0%)	E (0%)	E (0%)	S (36%)
Grietas en extremos	E (0%)	E (0%)	E (0%)	E (0%)
Contracción (%)				
Radial	1,4	1,2	2,1	2,2
Tangencial	2,3	2,3	3,4	3,7
Tiempo de secado (h)	96; 4 días		89; 3,7 días	

S: Estándar; C: Calidad; E : Exclusivo

En el ensayo 2, todas las determinaciones realizadas a la madera arrojaron una calidad "exclusiva". En el ensayo 3, en tanto, salvo un 36% de piezas que presentaron grietas superficiales (lo que la califica como "estándar"), la madera alcanzó calidad "exclusiva" en todas sus evaluaciones.

Al comparar entre ensayos se observa que los mejores resultados se obtienen con los programas 1 y 2; sin encontrarse diferencias entre ambos. A pesar de lo anterior, el programa 2 aparece como el mejor debido al menor tiempo utilizado para secar la madera.

La tabla 16 presenta el porcentaje de piezas defectuosas por tipo de alabeo y su nivel alcanzado.

Tabla 16: Porcentaje de piezas con defectos, por nivel y tipo de corte

Defecto	Nivel	Corte	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Acanaladura	S/defecto	Radial	100%	100%	100%
		Tangencial	100%	100%	100%
	Leve	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	-	-
	Moderado	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	-	-
	Severo	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	-	-
Torcedura	S/defecto	Radial	89%	89%	86%
		Tangencial	64%	64%	82%
	Leve	Radial	-	-	7%
		Tangencial	-	-	2%
	Moderado	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	-	8%
	Severo	Radial	11%	11%	7%
		Tangencial	36%	36%	8%
Arqueadura	S/defecto	Radial	50%	50%	57%
		Tangencial	64%	64%	40%
	Leve	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	-	-
	Moderado	Radial	-	2%	-
		Tangencial	-	7%	8%
	Severo	Radial	50%	43%	43%
		Tangencial	36%	29%	46%
Encorvadura	S/defecto	Radial	75%	75%	75%
		Tangencial	100%	100%	100%
	Leve	Radial	-	-	4%
		Tangencial	-	-	-
	Moderado	Radial	-	-	-
		Tangencial	-	-	-
	Severo	Radial	21%	25%	21%
		Tangencial	-	-	-

En ninguno de los dos ensayos ejecutados la madera presentó el alabeo acanaladura. La encorvadura se presentó en los tres ensayos, calidad "severo", con valores cercanos al 20% de las piezas ensayadas

Finalmente, se observa que aproximadamente la mitad de las piezas en cada uno de los ensayos no presentó arqueadura, sin embargo, la otra mitad presentó el defecto en forma severa.

Otros antecedentes evaluados indican que la madera alcanzó un promedio de densidad básica en torno a los 400 kg/m³, valor levemente superior al publicado por algunos autores y que alcanza los 344 kg/m³ (Pérez, 1983). Cabe señalar que el autor mencionado no indica la edad ni el origen de las plantaciones evaluadas.

2.3 CONCLUSIONES

- La madera de pino oregón no presenta dificultades para ser sometida a secado aplicando programas moderados, con temperaturas en torno a los 60 °C y gradientes de secado inferiores a 2,5 para espesores inferiores a 30 mm. Para espesores mayores, debido a los gradientes de humedad, es posible encontrar presencia de grietas superficiales e internas, por lo que se aconseja reducir las temperaturas en 5°C y los gradientes de secado en 0,5 respecto del caso anterior.
- Para espesores de 27 mm se obtienen los mejores resultados al secar con el programa 3. En madera de 54 mm, en tanto, los mejores resultados se obtienen con el programa 2.
- Los resultados obtenidos para todos los ensayos indican que a escala experimental no existen diferencias entre madera de corte radial y tangencial.

2.4 BIBLIOGRAFÍA

- Commission of the European Communities. 1994. Assessment of Drying Quality of Timber.
- INFOR. 2001. Boletín Estadístico 85. Instituto Forestal. Santiago, Chile. 99 p.
- INN. 1984. Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena. NCh 176/1 Of84. Madera. Parte 1: Determinación Humedad.
- INN. 1986. Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena. NCh 176/2 Of86. Madera. Parte 2: Determinación Densidad.
- INN. 1984. Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena. NCh 176/3 Of84. Madera. Parte 3: Determinación de la Contracción Radial y Tangencial.
- INN. 1972. Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena. NCh 993 EOf72. Madera. Procedimientos y Criterios de Evaluación para Clasificación.
- Pérez, V. 1983. Manual de propiedades físicas y mecánicas de la madera. Santiago, Chile. INFOR. 451 p.

CAPITULO III: SECADO DE LA MADERA: VALIDACIÓN INDUSTRIAL

3.1 METODOLOGÍA

La validación industrial se realizó en el aserradero de la empresa Forestal Voipir, ubicado en la ciudad de Villarrica, IX región. En esta empresa se implementaron los programas optimizados en el estudio a escala de laboratorio, utilizando un total de 133 m³ de madera aserrada.

Los programas de secado se ejecutaron en una cámara convencional marca VANICEK, de propiedad de la empresa. El equipo cuenta con una unidad de calefacción que permite generar el vapor requerido por el proceso, además de un sistema de humidificación de 8 inyectores de agua fría pulverizada y dos tinas de vapor. El sistema de ventilación está formado por 6 ventiladores conectados a un intercambiador del flujo de aire. La cámara, además, cuenta con un sistema de control automático, el que mediante un software, conectado a un PLC, controla y dirige el proceso según las condiciones del programa de secado que se esté aplicando.

La determinación del contenido de humedad inicial y densidad básica de las muestras se realizó de acuerdo a las normas Chilenas: NCh 176/1 Of84 - Parte 1 (INN, 1984a) y NCh 176/2 Of86 (INN, 1986), respectivamente. También se midieron las dimensiones y deformaciones iniciales de las muestras para determinar, posteriormente, la contracción y alabeos producto del secado.

3.1.1 Programas de secado evaluados

Se efectuaron 2 secados a escala industrial, con madera de 27 mm y 54 mm de espesor. En cada carga de secado se controló en forma manual el contenido de humedad durante el proceso, paralelo al monitoreo automático de los sensores de la cámara.

Las tablas 1 y 2 muestran los programas utilizados para la validación industrial. En los dos programas se consideró el contenido de humedad de la madera como variable de cambio entre etapas.

Tabla 1. Programa de secado 54 mm

Secado	Etapas	Temperatura (°C)		CHE(%)	Tiempo (h)
		Bulbo seco	Bulbo húmedo		
1	Calentamiento	50	50		5
	Verde - 25%	56	50	12	
	25% - 18%	58	50	10	
	18% - 14%	60	50	18,7	
	Acondicionado	90	90		2

Velocidad del aire: 3 m/s; CHE: Contenido de humedad de equilibrio.

¹ Ingeniero Forestal, Instituto Forestal - Unidad de Industrias

Tabla 2. Programa de secado 27mm

Secado	Etapa	Temperatura (°C)		CHE(%)	Tiempo (h)
		Bulbo seco	Bulbo húmedo		
2	Calentamiento	55	55		5
	Verde – 25%	56	50	12	
	25% - 14%	58	50	10	
	14% - 10%	60	50	8,7	
	Acondicionado	70	70		2

Velocidad del aire: 1,5 m/s; CHE: Contenido de humedad de equilibrio.

3.1.2 Procedimiento

Cada una de las cargas ensayadas se preparó con las siguientes características:

Tabla 3: Especificaciones de las cargas

Carga	Espesor (mm)	Anchos (Pulg.)	Largo (m)	Espesor separador (mm)	Volumen (m³)
1	54	3, 4 y 5	3,20	22	73
2	27	4, 5, 6 y 8	3,20	22	60

De cada carga se seleccionó aleatoriamente una muestra de 40 piezas, 20 radiales y 20 tangenciales, a las que se midió el ancho, largo y espesor, procurando que tuvieran un buen estado sanitario y no presentaran defectos previos al secado, como grietas, alabeos, canto muerto, etc.

Adicionalmente, en cada carga se incluyeron 4 muestras testigos con las que se controló el contenido de humedad durante el proceso. Cada una de ellas fue convenientemente sellada en sus extremos con el fin de evitar la excesiva pérdida de agua, simulando en este sentido el comportamiento de una pieza de mayor longitud.

3.1.3 Mediciones aplicadas para evaluar la calidad del secado

• Humedad de la madera y gradiente de humedad

Una vez finalizado el proceso de secado se determinó el contenido de humedad y el gradiente de humedad a la muestra, este último medido como la diferencia de humedad entre el centro y la superficie de la pieza.

La tabla 4 señala para la humedad final obtenida al término del secado, el grado de calidad que se le asigna a cada carga ensayada, en relación con la humedad objetivo.

En el caso del programa de 27 mm se definió una humedad objetivo de 18%.

Tabla 4. Variación de la humedad final obtenida con relación a la humedad objetivo

Clase de Calidad	Rango especificado por humedad objetivo (%)	
	Humedad objetivo 14 %	Humedad objetivo 18 %
S (Estándar)	±4,2	±5,4
C (Calidad)	±2,8	±3,6
E (Exclusivo)	±1,4	±1,8

Fuente: Commission of the European Communities (1994)

La tabla 5 indica para el gradiente de humedad final obtenido el grado de calidad que se le asigna a cada carga ensayada, respecto de la humedad final deseada.

Tabla 5: Variación permitida del gradiente de humedad en el interior de la pieza

Clase de Calidad	Rango especificado por humedad objetivo (%)	
	Humedad objetivo 14 %	Humedad objetivo 18%
S (Estándar)	> 5,6	> 7,2
C (Calidad)	2,8 – 4,2	3,6 – 5,4
E (Exclusivo)	< 2,8	< 3,6

Fuente: Commission of the European Communities (1994)

• Agrietamiento

La Tabla 6 indica los porcentajes de agrietamiento superficial y de extremos admisibles para cada uno de los niveles de calidad.

Tabla 6: Grados de agrietamiento superficial y de extremos

Calidad	Agrietamiento admisible (%)
S (Estándar)	Mayor al 10% de la carga
C (Calidad)	2 al 10% de la carga
E (Exclusivo)	Menor al 2% de la carga

Fuente: Commission of the European Communities (1994)

• Contracción

Para conocer el porcentaje de contracción de cada muestra de madera sometida al proceso de secado, inicialmente se identificaron, marcaron y midieron puntos en el espesor, ancho y largo de las piezas. Mediciones iguales se registraron al finalizar el secado. La contracción se determinó de acuerdo a lo descrito en la Norma Chilena NCh 176/3 Of84. Madera. Parte 3: Determinación de la contracción radial y tangencial (INN, 1984b).

Adicionalmente, se determinó el coeficiente de contracción (variación porcentual de la dimensión considerada en la madera verde, para una disminución de una unidad porcentual en el contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras). Su expresión, que es lineal, se expresa como sigue:

$$C_d = \frac{D_h - D_o}{D_h \cdot PSF} \times 100$$

Donde

C_d : Coeficiente de contracción en la dimensión considerada (radial, tangencial);

D_h : Dimensión considerada (radial, tangencial), en estado verde

D_o : Dimensión en estado totalmente seco

PSF : Punto de Saturación de las Fibras, en %

• Deformaciones

Al finalizar el secado se controlaron las deformaciones que presentó la muestra. Los alabeos evaluados correspondieron a la acanaladura, torcedura, arqueadura y encorvadura. Los valores máximos admisibles para cada una de los alabeos se presentan en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Niveles admisibles: 54 mm

Deformación	Ancho		Niveles de clasificación (mm)			
	(mm)	(Pulg)	Sin defecto	Leve	Moderado	Severo
Acanaladura	76	3	0	$0 < x \leq 1,5$	$1,5 < x \leq 3,0$	$> 3,0$
	102	4	0	$0 < x \leq 2$	$2 < x \leq 4,1$	$> 4,1$
	127	5	0	$0 < x \leq 2,5$	$2,5 < x \leq 5,1$	$> 5,1$
Arqueadura	Todos	Todos	0	$0 < x \leq 14,3$	$14,3 < x \leq 28,6$	$> 28,6$
Encorvadura	76	3	0	$0 < x \leq 10$	$10 < x \leq 20$	> 20
	102	4	0	$0 < x \leq 8$	$8 < x \leq 15$	> 15
	127	5	0	$0 < x \leq 6$	$6 < x \leq 12$	> 12
Torcedura	76	3	0	$0 < x \leq 2,3$	$2,3 < x \leq 3,8$	$> 3,8$
	102	4	0	$0 < x \leq 4,1$	$4,1 < x \leq 7,1$	$> 7,1$
	127	5	0	$0 < x \leq 5,1$	$5,1 < x \leq 8,9$	$> 8,9$

Fuente: INN (1972)

Tabla 8. Niveles admisibles: 27 mm

Deformación	Ancho		Niveles de clasificación (mm)			
	(mm)	(Pulg)	Sin defecto	Leve	Moderado	Severo
Acanaladura	102	4	0	$0 < x \leq 2$	$2 < x \leq 4,1$	$> 4,1$
	127	5	0	$0 < x \leq 2,5$	$2,5 < x \leq 5,1$	$> 5,1$
	152	6	0	$0 < x \leq 3$	$3 < x \leq 6,1$	$> 6,1$
	203	8	0	$0 < x \leq 4,1$	$4,1 < x \leq 8,1$	$> 8,1$
Arqueadura	Todos	Todos	0	$0 < x \leq 28,5$	$28,5 < x \leq 56,9$	$> 56,9$
Encorvadura	102	4	0	$0 < x \leq 8$	$8 < x \leq 15$	> 15
	127	5	0	$0 < x \leq 6$	$6 < x \leq 12$	> 12
	152	6	0	$0 < x \leq 5$	$5 < x \leq 10$	> 10
	203	8	0	$0 < x \leq 4$	$4 < x \leq 8$	> 8
Torcedura	102	4	0	$0 < x \leq 8,2$	$8,2 < x \leq 16,3$	$> 16,3$
	127	5	0	$0 < x \leq 10,2$	$10,2 < x \leq 20,3$	$> 20,3$
	152	6	0	$0 < x \leq 12,2$	$12,2 < x \leq 24,3$	$> 24,3$
	203	8	0	$0 < x \leq 16,2$	$16,2 < x \leq 32,5$	$> 32,5$

Fuente: INN (1972)

3.2 RESULTADOS

3.2.1 Programa de secado aplicado a madera de 54 mm de espesor

Las siguientes tablas muestran los resultados de las evaluaciones realizadas a la muestra de 54 mm de espesor. Como muestra la tabla 10, la humedad final promedio alcanzada fue de un 16%, siendo este valor un 2% mayor a la humedad objetivo considerada.

El Gradiente de humedad final promedio alcanzó el nivel de secado "exclusivo", con un 2,5% en el ensayo.

Tabla 10: Evaluación de humedad final y gradiente

Variable	Humedad inicial	Humedad Objetivo	Humedad final promedio	Nivel de calidad
Contenido humedad (%)	53	14	16	Calidad
Gradiente (%)			2,5	Exclusivo

La presencia de grietas superficiales alcanzó el 10%, calificando esta variable con el nivel "calidad".

En el corte radial, las grietas en los extremos alcanzaron el nivel de "calidad". En el corte tangencial se registró un 5% más que en el caso anterior (tabla 11), calificando en el nivel de calidad "estándar".

Tabla 11: Evaluación presencia de grietas

Parámetro	Tipo de corte	
	Radial	Tangencial
Grietas superficiales (%)	10 (C)	10 (C)
Grietas en extremos (%)	10 (C)	15 (S)

Respecto de la contracción, la tabla 12 muestra valores de 1,6 y 2,5 para los casos radial y tangencial, respectivamente.

Tabla 12: Contracción

Contracción al 14%		Tipo de corte		Promedio	Coeficiente de contracción
		Radial	Tangencial		
Radial	(%)	1,65	1,58	1,6	0,16
Tangencial	(%)	1,96	2,97	2,5	0,20

La velocidad del aire promedio registrada al interior de la cámara entre las piezas de madera fue de 1,9 m/s (tabla 13).

Debido a una falla presentada en el sistema de control de la cámara durante el proceso de secado, se produjo una extensión del 31% del tiempo comparado con la etapa de laboratorio.

Tabla 13: Velocidad del aire y tiempo de secado

Parámetro	Obtenido
Velocidad del aire entre piezas (m/s)	1,9
Tiempo de secado (h; días)	141; 5,88

Las deformaciones de mayor proporción fueron la arqueadura y encorvadura, pero sólo en un nivel calificado como "leve" (tabla 14). Una sola pieza presentó la encorvadura en un nivel calificado como "moderado".

Tabla 14: Alabeos

Alabeo	Sin defecto (%)		Leve (%)		Moderado (%)		Severo (%)	
	Radial	Tang.	Radial	Tang.	Radial	Tang.	Radial	Tang.
Acanaladura	100	100	0	0	0	0	0	0
Arqueadura	60	60	40	40	0	0	0	0
Encorvadura	55	60	45	35	0	5	0	0
Torcedura	95	90	5	10	0	0	0	0

3.2.2 Programa de secado aplicado a madera de 27 mm de espesor

Las siguientes tablas muestran los resultados de las evaluaciones realizadas a la muestra de 27 mm de espesor. No obstante que la humedad final objetivo del programa a evaluar fue del 10%, en este ensayo se programó una humedad final objetivo del 18%.

La humedad final promedio alcanzada en el secado industrial fue de un 17%, calificando con un nivel de calidad "exclusivo" (tabla 15). El gradiente de humedad final promedio también alcanzó el nivel de calidad "exclusivo" con un 2,3%.

Tabla 15: Evaluación de humedad final y gradiente

Variable	Humedad inicial	Humedad Objetivo	Humedad final promedio	Nivel de Calidad
Contenido humedad (%)	48	18	17	Exclusivo
Gradiente (%)			2,3	Exclusivo

Solo se detectó un 5% de presencia de grietas en los extremos (tabla 16); encontrándose en piezas con corte tangencial, calificando en un nivel de secado de "calidad". El resto de las piezas calificó en el nivel de secado "exclusivo", no encontrándose grietas superficiales ni en los extremos.

Tabla 16: Evaluación presencia de grietas

Parámetro	Tipo de corte	
	Radial	Tangencial
Grietas superficiales (%)	0 (E)	0 (E)
Grietas en extremos (%)	0 (E)	5 (C)

Respecto de la contracción, la tabla 17 muestra valores de 0,94 y 1,61 para los casos radial y tangencial, respectivamente.

Tabla 17: Contracción

Contracción al 18%		Tipo de corte		Promedio	Coeficiente de contracción
		Radial	Tang.		
Radial	(%)	1,14	0,74	0,94	0,15
Tangencial	(%)	1,30	1,92	1,61	0,21

La velocidad promedio del aire registrada entre tablas fue de 1,9 m/s (tabla 18).

Tabla 18: Velocidad del aire y tiempo de secado

Parámetro	Obtenido	Laboratorio
Velocidad del aire entre piezas (m/s)	1,9	1,5
Tiempo de secado (h; días)	39; 1,63	89; 3,71

De los alabeos analizados, se aprecia que el más frecuente fue la arqueadura, presente en casi todas las piezas medidas, calificado con un nivel "leve". El único alabeo que se presentó en carácter moderado fue la encorvadura, con una intensidad del 10% de las piezas.

Tabla 19: Alabeos

Alabeo	Sin defecto (%)		Leve (%)		Moderado (%)		Severo (%)	
	Radial	Tang.	Radial	Tang.	Radial	Tang.	Radial	Tang.
Acanaladura	95	90	5	10	0	0	0	0
Arqueadura	5	30	95	70	0	0	0	0
Encorvadura	50	50	40	50	10	0	0	0
Torcedura	75	60	25	40	0	0	0	0

3.3 CONCLUSIONES

Los dos programas de secado validados a escala industrial muestran buenos niveles de calidad de la madera.

El programa para 54 mm no se desarrolló en forma normal por problemas ocurridos con el sistema de control de la cámara, extendiéndose más del tiempo que el registrado a escala de laboratorio. No obstante lo anterior, se mantienen buenos niveles de calidad para el producto madera seca de pino oregón.

El programa para 27 mm de espesor entregó buenos resultados, disminuyendo el tiempo de secado en comparación a la etapa de laboratorio. Si bien existe presencia de defectos, éstos en su mayoría se clasifican como "leves".

Se aconseja la utilización de pesos sobre la carga, con lo que disminuirían las deformaciones en la madera.

3.4 BIBLIOGRAFÍA

- Commission of the European Communities. 1994. Assessment of Drying Quality of Timber.
- INN. 1984a. Norma Chilena. NCh 176/1 Of84. Madera. Parte 1: Determinación Humedad.
- INN. 1984b. Norma Chilena. NCh 176/3 Of84. Madera. Parte 3: Determinación de la Contracción Radial y Tangencial.
- INN. 1986. Norma Chilena. NCh 176/2 Of86. Madera. Parte 2: Determinación Densidad.
- INN. 1972. Norma Chilena. NCh 993 EO72. Madera. Procedimientos y Criterios de Evaluación para Clasificación.

CAPITULO IV: TRABAJABILIDAD DE LA MADERA

El comportamiento mecánico de la madera constituye un indicador importante cuando se pretende procesar mecánicamente cualquier especie y transformarla en algún producto que pretenda ser comercializado.

La fabricación de la mayoría de los productos que actualmente procesa la industria de transformación secundaria se basa fundamentalmente en una sola especie (*Pinus radiata* D. Don), y por esto las condiciones de procesamiento con las que se cuenta en la mayor parte de las empresas están orientadas a satisfacer las condiciones en las cuales esta especie se comporta de la mejor manera. Dado lo anterior, al cambiar la materia prima se requiere del conocimiento de esta especie frente a algunos procesos secundarios, y por ende se plantean los siguientes objetivos:

- Determinar el comportamiento de la madera de pino oregón frente a distintos procesos de maquinado, según lo establecido en la norma ASTM D1666-94.
- Establecer recomendaciones respecto de las mejores condiciones de operación para cada proceso evaluado.
- Determinar diferencias en el comportamiento de la madera en función de la altura del árbol que es procesada.

4.1 METODOLOGÍA

El material experimental utilizado en esta investigación corresponde a árboles que provienen del fundo Voipir (camino a Racún, IX región) cuyas principales características corresponden a: edad de plantación 40 años, DAP promedio 34 cm, altura promedio rodal 32 metros y origen de la semilla EEUU.

Para llevar a cabo los objetivos planteados en este estudio, se utilizaron 5 árboles de la especie, cada uno de los cuales fue trozado a 5 alturas diferentes desde la base a la copa de cada árbol, tal y como se señala en la siguiente figura:

Una vez codificados los trozos (de acuerdo al árbol y altura a la que corresponden), se realizó la operación de aserrado para la obtención de las probetas matrices, de acuerdo a la especificación de la norma utilizada para la evaluación y que considera un total de 50 matrices como mínimo para caracterizar cualquier especie. En este caso, el diseño experimental consideró: 5 árboles, 5 alturas y 2 tipos de corte.

¹ Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Universidad del Bío-Bío - Depto. de Ingeniería en Maderas

² Ingeniero de Ejecución en Maderas, Asesor externo

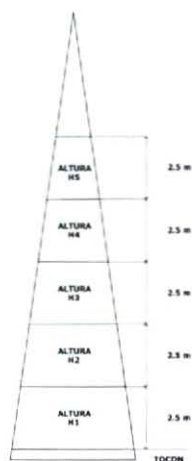
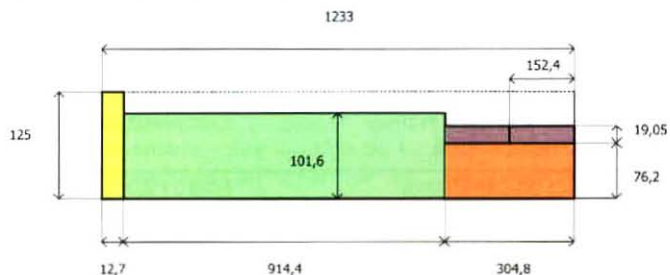


Figura 1: Extracción de trozos en el árbol

Luego, se procedió a encastillar y secar las matrices por 9 días en una cámara cilíndrica, sólo con la ayuda de aire, hasta un contenido de humedad cercano al 15%; para finalmente climatizar con el fin de alcanzar y homogeneizar la humedad a un 12%.

Al concluir la etapa de secado y acondicionado comenzó el proceso de obtención de probetas de acuerdo a lo indicado en la norma (ver figura 2), generándose 350 muestras para los siguientes ensayos: cepillado, lijado, moldurado, taladrado, escopleado (50 probetas por cada uno de éstos) y torneado (100 probetas).



Nota 1: medidas en milímetros.

Nota 2: el color de la probeta indica el ensayo.

- Cepillado, Lijado
- Moldurado, Escopleado y Taladrado
- Torneado
- Densidad

Figura 2: Dimensiones de las probetas de los ensayos de trabajabilidad.

Los ensayos de trabajabilidad en la madera se realizaron de acuerdo a las condiciones de trabajo establecidas en la norma ASTM D1666-87 (ASTM.1994) (ver tabla 1) y que

consideran la evaluación cualitativa de las superficies maquinadas, mediante una inspección visual y una clasificación de cinco grados de calidad en base a los defectos presentes en la superficie (ver tabla 2).

El análisis estadístico se llevó a cabo comparando la proporción de piezas exitosas v/s aquellas fracasadas, donde para cada ensayo se define el éxito como aquellas probetas que clasifican los grados determinados en ese ensayo y el fracaso corresponde a las piezas clasificadas en los grados no considerados.

En forma adicional, se realizó una medición de densidad normal ($S_{12,12}$) según lo explicitado en la norma chilena NCh 176/2 Of88 (INN, 1988) y un conteo del número de anillos por probeta.

Tabla 1: Condiciones de trabajo por ensayo de trabajabilidad

Ensayo	Condiciones de trabajo	Elemento de corte y máquina
Cepillado	Marcas por pulgada: MPP = 8, 12 y 16 ($\zeta = 20^\circ$) Angulo de ataque: $\gamma = 15, 20, 25$ y 30° (MPP = 20) Profundidad de corte = 1,5 mm	Acero HSS. Moldurera 5 cabezales.
Lijado	Velocidad de avance: $U = 4,5$ y 9 m/min Granulometría: 80 granos para desbaste y 120 granos para acabado superficial. Profundidad de corte = 1 mm	Granos de óxido de aluminio. Lijadora calibradora.
Moldurado (matrizado)	Número de cuchillos $z = 4$ Angulo de ataque $\gamma = 18^\circ$ Angulo de alivio $\alpha = 19^\circ$ r.p.m. cabezal = 7000	Acero HSS. Tupí.
Escopleado	Diámetro mecha = 12 mm. Largo escoplo = 25 mm r.p.m. mecha = 8500	Acero HSS. Escopleadora.
Taladrado	Diámetro broca = 20 mm Angulo de hélice = 42° r.p.m. broca = 2830	Acero HSS. Taladro de pedestal.
Torneado	Angulo de ataque $\gamma = 55^\circ$ r.p.m. probeta = 3000	Acero H13 templado. Torno copiadador.

Cabe señalar que la norma establece para el ensayo de cepillado que se realicen siete corridas probando diferentes ángulos de ataque y diferentes condiciones de calidad (MPP). Antes de pasar a la siguiente condición debe evaluarse la calidad de la superficie generada.

En el ensayo de lijado, la norma establece que la operación debe realizarse a una velocidad de 6 m/min; sin embargo, por razones técnicas el ensayo se realizó bajo dos condiciones (4,5 y 9 m/min).

Tabla 2: Grados de clasificación visual por ensayo

Grado	Definición	Ensayo
1: Excelente	Se refiere a todas las probetas que no presentan ningún tipo de defecto o que tienen fibra levantada alrededor de los nudos y que se observan sólo con luz oblicua.	Todos
2: Muy bueno	Todas las probetas que tienen entre un 10% y un 20% del área procesada con fibra levantada solamente.	Todos
3: Bueno	Todas las probetas que tengan presencia mínima de grano desgarrado y/o aquellas que tienen fibra levantada en un 20 hasta un 30% del área procesada.	Cepillado, Moldurado Torneado, Escopleado y Taladrado
	Comprende todas las probetas que tengan presencia mínima de madera levantada en un rango máximo de 20 a 30% del área procesada.	Lijado
4: Malo	Todas aquellas probetas que presentan fibra levantada en un 30% y hasta un 40% del área procesada y/o aquellas que muestren grano desgarrado hasta en un 30% del área.	Cepillado, Moldurado Torneado, Escopleado y Taladrado
	Todas las probetas que presentan madera encontrada en un máximo de 20 a 30% del área procesada y/o fibra levantada hasta en un 40% del área.	Lijado
5: Muy malo	Todas las probetas que presentan fibra levantada sobre un 40% de su área y/o grano desgarrado en un valor mayor al 30% del área procesada.	Cepillado, Moldurado Torneado, Escopleado y Taladrado
	Todas las probetas que presentan fibra levantada sobre un 40% de su área y/o madera encontrada en más de un 30% del área procesada.	Lijado

4.2 RESULTADOS

4.2.1 Cepillado

Efecto del ángulo de ataque sobre la calidad de la superficie: Tal y como era de esperarse la calidad de la superficie fue afectada por este parámetro. La figura 3 muestra como la proporción promedio de piezas exitosas- que corresponden a las clasificadas en grado 1, aumenta desde 16% al procesar con un ángulo de 15° hasta un 38% cuando se utiliza un ángulo de 25°. El cambio desde 25 a 30° afecta de manera negativa la calidad de la madera, alcanzando, en promedio, sólo un 16% de piezas exitosas.

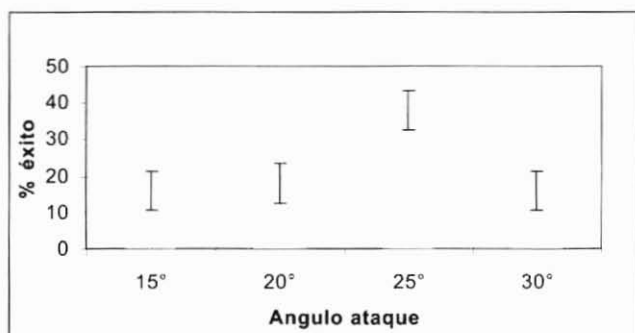


Figura 3: Efecto del ángulo de ataque en la proporción de piezas exitosas- 20 MPP.

La figura muestra, además de la proporción media de éxito alcanzado, el error estándar asociado para cada una de las condiciones, encontrándose que para la mejor condición de corte (25°), la proporción de piezas exitosas alcanzaría entre un 31 y 45%. Adicionalmente, para esta misma condición se establece que las piezas tangenciales alcanzan una proporción mayor (56%) estadísticamente diferente a las piezas radiales (20%).

Entre alturas para un ángulo de 25°, se aprecia el mayor porcentaje de piezas exitosas en la altura H_3 , con un 50%, en tanto que la menor proporción se encuentra en las alturas H_2 y H_4 .

Efecto de las marcas de cuchillo por pulgada en la calidad superficial: Tal y como lo indica la teoría, un aumento de este parámetro afecta de manera positiva la calidad de la superficie procesada. Es así como, en la figura 4 se observa que el porcentaje de piezas libres de defecto aumenta desde 0% hasta 18%, cuando el número de marcas también aumenta desde 8 hasta 20.

Al analizar la mejor condición (20 MPP) y comparar los resultados entre tipos de corte se observan diferencias; sin embargo, estadísticamente no son significativas (20% y 16% de éxito para piezas tangenciales y radiales, respectivamente).

Para la misma condición, el comportamiento entre alturas indica en general, bajos porcentajes con un máximo de 30% de éxito en la altura H_5 y un mínimo de 10% en las alturas H_2 y H_4 .

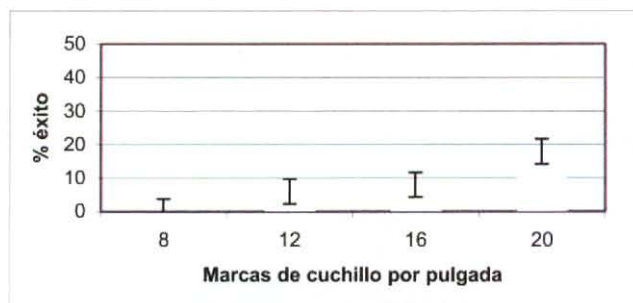


Figura 4: Efecto de las marcas de cuchillo sobre la proporción de éxito del ensayo- $\alpha = 20^\circ$

Es importante mencionar que de acuerdo a lo señalado por la norma, esta última evaluación está realizada con un ángulo de ataque correspondiente a 20° , el que no corresponde a la mejor opción para procesar esta especie. Dado lo anterior al utilizar el ángulo correcto, la proporción de éxito debería aumentar a un valor mayor.

4.2.2 Lijado

El análisis de los datos de este ensayo indica que un 58% del total de las piezas procesadas se clasifican como exitosas (grado 1 y 2), independiente de la velocidad utilizada para el ensayo y del tipo de corte, esto porque en ambos casos la proporción de éxito se repite.

Al comparar entre alturas, el mejor resultado se observa en la altura H_4 con un 70%, en tanto que las menores proporciones de éxito se encuentran en las alturas H_3 y H_5 (50%).

4.2.3 Moldurado

Para este ensayo se utiliza una plantilla que permite copiar el perfil previamente definido por la norma. La evaluación de la superficie se realiza en la zona curva del perfil generado (ver figura 5).

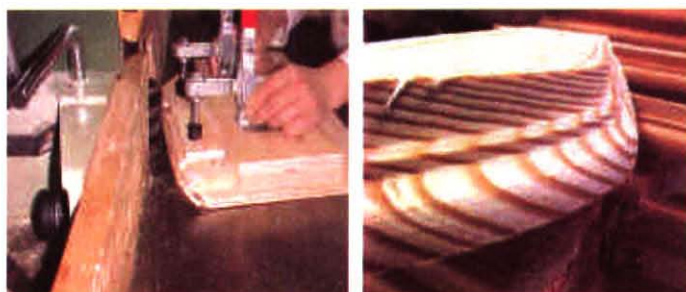


Figura 5: Plantilla utilizada, ensayo en proceso y perfil terminado.

Los resultados del ensayo indican que una alta proporción de las piezas evaluadas (94%) alcanzó la condición de éxito (clasificación en grado 1 y 2).

Al analizar entre tipos de corte, se observa una mayor proporción de éxito en las piezas radiales aunque sin diferencias estadísticas significativas respecto del tangencial (ver figura 6).



Figura 6: Porcentaje de éxito según tipo de corte

Al revisar el comportamiento entre alturas, se aprecia un 100% de piezas exitosas en las alturas H_1 y H_2 , en tanto que para el resto de las alturas el éxito alcanza un porcentaje de 90%.

4.2.4 Taladrado

Para este ensayo, la evaluación se realiza considerando el área completa de perforación. La figura 7 muestra el equipo utilizado para la fabricación del orificio y la herramienta de corte en proceso.



Figura 7: Plantilla de torneado y probeta terminada

La proporción de éxito corresponde a aquellas piezas clasificadas en grados 1 y 2, y de acuerdo a los resultados se obtiene que un 76% de las piezas alcanzó dicha condición.

Al comparar los tipos de corte se aprecia para las piezas radiales el mayor porcentaje de éxito, con un valor de 92% superior y estadísticamente distinto del tangencial que sólo alcanza un 60% (ver figura 8). Entre alturas, la mayor proporción de éxito se alcanza en la altura H_3 (90%) y la menor en la altura H_2 (60%).

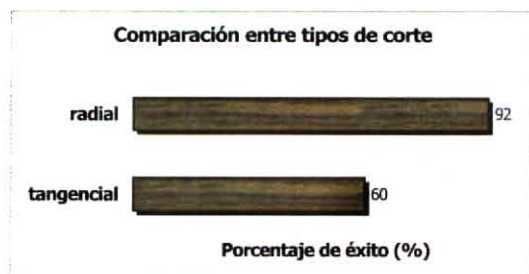


Figura 8: Porcentaje de éxito según tipo de corte

4.2.5 Escopleado

En este ensayo, la proporción de éxito alcanzó un promedio de 76% que corresponde a todas aquellas clasificadas en los grados 1, 2 y 3. Respecto de los tipos de corte, se observa en las piezas radiales un éxito de 80%, sin diferencias estadísticas significativas con las tangenciales que alcanzan sólo un 72% (ver figura 9).

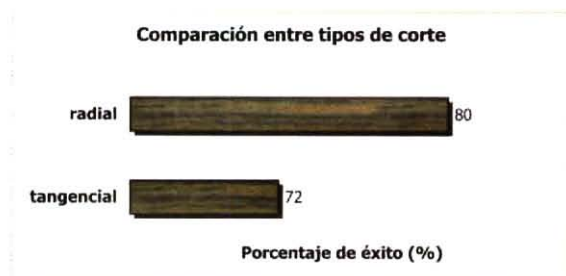


Figura 9: Porcentaje de éxito según tipo de corte

De las alturas se tiene, que el mayor porcentaje de éxito se encuentra en la altura H_5 con un 90%, en tanto que el menor corresponde a un 70% para las alturas H_2 , H_3 y H_4 .

4.2.6 Torneado

En este ensayo, se utiliza una plantilla previamente definida por la norma, la cual es montada en el torno y posteriormente copiada sobre la madera. La figura 10 muestra la plantilla, el equipo y la probeta terminada.

Los resultados promedio obtenidos para este ensayo, señalan que un 71% de las piezas alcanza condición de éxito (piezas clasificadas en los grados 1, 2 y 3).

Respecto de los tipos de corte, se observa que las radiales alcanzan un 84% de éxito, valor diferenciado estadísticamente de la proporción exitosa encontrada para las piezas tangenciales que llegó a un 58% (ver figura 11).

Al comparar las proporciones de éxito entre alturas, se observa el mayor valor en la altura H_4 con un 90%, en tanto que el menor valor correspondió a la altura H_2 con un 55%.



Figura 10: Plantilla utilizada y probeta terminada



Figura 11: Porcentaje de éxito, según tipos de corte

4.2.7 Densidad y número de anillos

La densidad normal promedio para las piezas ensayadas alcanzó un valor de 496 kg/m³, en tanto que el número de anillos promedio resultó ser de 5. Por tipo de corte, se obtuvo un promedio de 475 kg/m³ en las piezas radiales y 518 kg/m³ en las tangenciales.



Figura 12: Densidad normal promedio según tipo de corte

Respecto del número de anillos, se registró un promedio de 4 para las probetas de corte radial y 5 para las de corte tangencial. La superioridad del valor de densidad normal en las probetas de corte tangencial radica en que fueron extraídas de zonas cercanas a la corteza, donde se presenta una mayor cantidad de anillos por pulgada.

En la figura 13 se observa que una tendencia descendente en el valor de la densidad a medida que la altura en el árbol crece, salvo en el caso de la altura H_2 y H_3 que presenta un crecimiento de la primera a la segunda, esto producto de la extracción de las probetas.

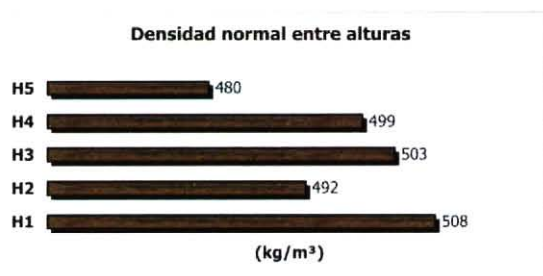


Figura 13: Densidad normal según altura en el árbol

4.3 CONCLUSIONES

Para el ensayo de cepillado, el mayor porcentaje de piezas exitosas se obtiene al procesar la madera con un ángulo de 25° (38%). Entre tipos de corte, el tangencial presenta una proporción estadísticamente mayor que el radial.

Respecto del efecto de las marcas de cuchillo, se tiene que, a medida que aumenta la cantidad de marcas por pulgada la proporción de piezas exitosas también aumenta. Respecto de los cortes, se observa que no existen diferencias significativas entre éstos.

Para el ensayo de lijado, no se observan diferencias estadísticas significativas entre las diferentes variables utilizadas en el ensayo, alcanzando en ambos casos un 58% de éxito. Más aún, entre tipos de corte y alturas, las proporciones de éxito se mantienen estadísticamente iguales.

En el moldurado se registró un 94% como proporción de éxito y, en la comparación entre tipos de corte o alturas en el árbol, no se presentaron diferencias estadísticas significativas.

Para el ensayo de escopleado, la proporción de éxito alcanza un valor de 76%, sin diferencias estadísticas significativas entre los tipos de corte y alturas.

Los resultados del ensayo de taladrado indican que un 76% de las piezas se clasifica como exitosa, encontrándose que el corte radial presenta una significativa mayor proporción de éxito que el tangencial.

En el ensayo de torneado, la proporción de piezas exitosas alcanza el 71%, alcanzando para el corte radial un mayor valor, el cual presenta diferencias estadísticas con el corte tangencial.

La densidad normal presenta un valor menor en la base y mayor en la copa, alcanzando un promedio de 496 kg/m³. El crecimiento de la especie presenta un promedio de 5 anillos por pulgada.

En términos generales la especie presenta altos porcentajes de éxito en todos los ensayos, con excepción del cepillado y lijado.

A pesar de realizar el estudio de acuerdo a lo indicado por la norma se hace necesario conocer algunas modificaciones a la normativa con el fin de verificar si la proporción de éxito aumenta en estos ensayos, por ejemplo: en cepillado claramente la mejor condición se obtiene al procesar con 25°, sin embargo, estudios complementarios podrían establecer que sucede con el éxito si se modifican las velocidades de avance o el número de cuchillos utilizados en la operación. En lijado, tal vez dada la densidad de la madera es necesario utilizar granos de lija más finos con el fin de disminuir la presencia de defectos que descalifican las superficies.

4.4 BIBLIOGRAFÍA

ASTM. 1994. ASTM D1666-87. Standards Methods for Conducting Machining Test of Wood and Wood-Base Materials.

Catálogo Weinig. Todo sobre Herramientas.

George, Tsoumis. 1991. Science and Technology of Wood: Structure, Properties, Utilization.

Hoff, K.; Fisher, N.; Miller, S.; Webb, A.. 1997. Sources of competitiveness for a secondary wood products firms: A review of literature and research Issues. Forest Products Journal 47 (2): 31-37.

Koch P. 1964. Woodmachining process.

Ratnasingam, J. 1999. Productivity in wood machining processes- a question of simple economics?. Holz als Roh-und Werkstoff 57 (1999) 51-56.

CAPITULO V: ENCOLABILIDAD DE LA MADERA

Actualmente, la industria secundaria de nuestro país fabrica productos que van desde blanks y molduras hasta partes y piezas de muebles, ventanas y otros; donde, la gran mayoría de éstos se basan en la utilización del pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) y adhesivos del tipo polivinil acetato (PVA) como materias primas. Al cambiar el sustrato que debe ser encolado se generan cambios en la resistencia de las uniones adhesivas, puesto que la anatomía de las diferentes especies incide en el comportamiento general de dichas uniones.

Basado en lo anterior, es importante conocer el comportamiento de adhesivos, que hoy en día se comercializan en el país, en especies diferentes que pretenden ser incorporadas al sistema productivo chileno. Es por esto, que se plantean los siguientes objetivos

- Evaluar el comportamiento de uniones encoladas dentadas (finger-joint) fabricadas con madera de pino oregón, según lo establecido por la norma ASTM D-5572.
- Evaluar el comportamiento de uniones encoladas laminares fabricadas con madera de pino oregón, según lo establecido por la norma ASTM D-5751.

5.1 METODOLOGÍA

El estudio fue realizado sobre una muestra de 5 árboles, los que fueron trozados y aserrados de manera tal de obtener piezas tangenciales y radiales en un espesor 35 mm y ancho variable según el diámetro de cada trozo. Obtenidas las piezas se inició la etapa de secado, realizado aceleradamente en un cilindro de secado al vacío sólo con acción de los ventiladores, hasta llegar a un contenido de humedad cercano al 15%. Esta operación se extendió aproximadamente por nueve días y fue supervisada diariamente para controlar la humedad de la madera.

Luego, las piezas fueron trasladadas a una cámara de clima para disminuir y homogeneizar el contenido de humedad a un 12% tal y como lo exigen las normas utilizadas para estas evaluaciones. Una vez que la madera alcanzó el contenido de humedad deseado, las piezas fueron partidas a un ancho aproximado de 60 mm. para luego ser cepilladas y trozadas eliminando todos los defectos presentes. Finalmente, fueron tomadas al azar piezas para la fabricación de uniones dentadas y uniones laminares, ambos tipos con dos diferentes adhesivos (interior y exterior) de la empresa Clariant Colorquímica (Chile). El proceso de fabricación de ambos tipos de uniones se observa en las siguientes fotografías:

¹ Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Universidad del Bio-Bio - Depto. de Ingeniería en Maderas

² Ingeniero de Ejecución en Maderas, Asesor externo

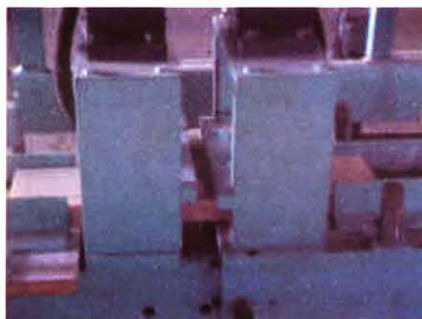


Figura 1: Fabricación de uniones dentadas, confección del perfil y prensado de la madera



Figura 2: Fabricación de uniones laminares, configuración en prensa

Todas las piezas encoladas fueron acondicionadas por una semana en cámara de climatización bajo condiciones ambientales normales de humedad y temperatura ($20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ y $60 \pm 5\%$ HR.) con el fin de asegurar el secado de la línea de cola, para luego ser probeteados de acuerdo a lo indicado por cada una de las normas.

5.1.1 Uniones Dentadas

La norma utilizada para la evaluación de la calidad del encolado en uniones dentadas especifica la realización de ensayos de flexión y tracción bajo diferentes ciclos de envejecimientos en función del tipo de adhesivo que se pretende evaluar.

Para el caso de adhesivos de interior se establecen cuatro envejecimientos en el caso de flexión y cuatro para el caso de tracción, por lo que un total de 80 para flexión y 80 probetas para tracción fueron obtenidas desde las muestras encoladas.

En el caso de adhesivos de exterior, se establecen cuatro condiciones para tracción (80 probetas) y cuatro para flexión; sin embargo, sólo tres de éstos presentan requerimientos que deben ser satisfechos por lo que se requieren solamente 60 probetas.

Las siguientes figuras muestran las dimensiones y forma de las probetas requeridas para cada ensayo.

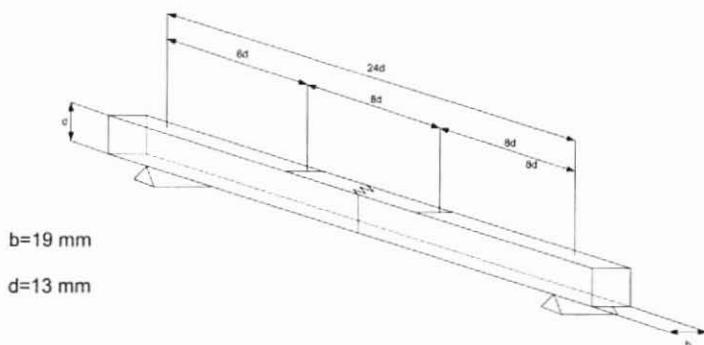


Figura 3: Dimensión y forma probeta de flexión, norma ASTM D 5572

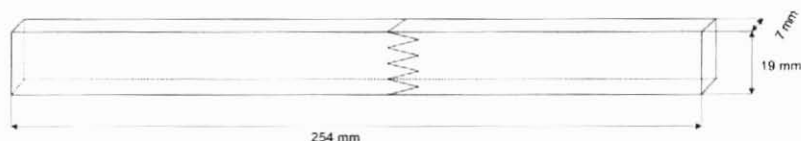


Figura 4: Dimensión y forma probeta de tracción, norma ASTM D 5572

Una vez obtenidas todas las probetas necesarias para cada ensayo, aleatoriamente se seleccionan 20 de ellas para cada uno de los envejecimientos determinados. Los ciclos establecidos por la norma para los diferentes tipos de adhesivos son los siguientes:

Uso Interior

Test condiciones normales: Evaluar el adhesivo luego de al menos una semana de la fabricación de la unión.

Test de tres ciclos (agua fría): Inmersión en agua a $19 - 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 4 horas; luego secado por 19 horas a $41 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Repetir por un total de tres ciclos y efectuar los ensayos.

Test elevada temperatura: Secado a $104 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 6 horas; retirar las muestras y envolverlas en PVC. Colocar las muestras envueltas en estufa a $110 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un mínimo de 12 minutos y un máximo de 22 minutos. Retirar y someter a ensayo sin retirar la envoltura y durante los siguientes 30 segundos en una pieza acondicionada a $24 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Test acelerado de temperatura-humedad: Acondicionar a 16% de contenido de humedad de equilibrio. Envolver en PVC y colocar en estufa a $65 \pm 1^\circ\text{C}$ entre 12 y 20 minutos. Retirar de a una probeta y testear dentro de 30 seg. en ambiente a 24°C .

Uso exterior

Test condiciones normales: Evaluar el adhesivo luego de al menos una semana de la fabricación de la unión.

Test ebullición: Inmersión en agua hirviendo por 4 horas, luego secado en estufa a $63 \pm 3^\circ\text{C}$. Repetir la inmersión y enfriar en agua ($18 - 27^\circ\text{C}$) por un período de 1 hora y ensayar.

Test elevada temperatura: Secado a $104 \pm 3^\circ\text{C}$ por 6 horas; retirar las muestras y envolverlas en PVC. Colocar las muestras envueltas en estufa a $110 \pm 3^\circ\text{C}$ por un mínimo de 12 minutos y un máximo de 22 minutos. Retirar y someter a ensayo sin retirar la envoltura y durante los siguientes 30 segundos en una pieza acondicionada a $24 \pm 3^\circ\text{C}$.

Test vacío-presión: Introducir las probetas en un cilindro y sumergir por completo en agua fría. Aplicar un vacío de 84,4 kPa por 30 minutos, luego aliviar el vacío y aplicar presión de 517 $\pm$ 14 kPa por 30 minutos para luego ensayar.

Finalizado cada ciclo de envejecimiento, las probetas son sometidas a ensayo de acuerdo a las indicaciones de la norma. Para el ensayo de flexión se establece un único requerimiento de resistencia (módulo de ruptura), mientras que para tracción, los requerimientos indicados corresponden a resistencia y falla de madera en dos condiciones (ver tablas siguientes).



Figura 5: Ensayos de flexión y tracción, según norma ASTM D 5572

Tabla 1: Requerimientos Norma ASTM D 5572, adhesivo uso interior

Test	Resistencia (MPa)	Tracción		Flexión MOR (MPa)
		Falla Madera (%) Grupal ¹	Individual ²	
Condiciones normales	13,8	60	30	13,8
Tres ciclos	6,9	30	15	6,9
Elevada Temperatura	6,9	Sin requisito	Sin requisito	Sin requisito
Temperatura-humedad	5,2	Sin requisito	Sin requisito	Sin requisito

Tabla 2: Requerimientos Norma ASTM D 5572, adhesivo uso exterior

Test	Resistencia (MPa)	Tracción		Flexión MOR (MPa)
		Falla Madera (%) Grupal ¹	Individual ²	
Condiciones normales	13,8	60	30	13,8
Ebullición	11,0	50	25	9,7
Elevada Temperatura	6,9	Sin requisito	Sin requisito	Sin requisito
Vacio Presión	11,0	50	25	9,7

5.1.2 Uniones Laminares

La norma utilizada para la evaluación de la calidad del encolado en uniones laminares especifica la realización de un ensayo de cizalle por compresión bajo diferentes ciclos de envejecimientos que dependen del tipo de adhesivo que se evalúa. Obtenidas todas las probetas necesarias para este ensayo (140, 60 correspondientes a unión interior y las restantes para unión exterior), se seleccionan al azar 20 probetas para cada ciclo (ver figura 6); las que son sometidas a las mismas condiciones que en el caso de las uniones dentadas.

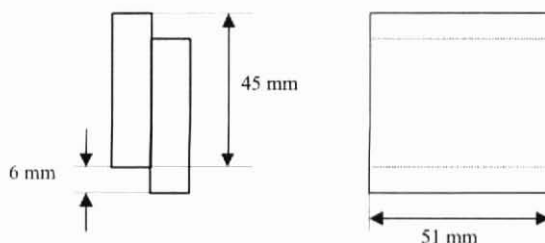


Figura 6: Dimensión y forma probeta de cizalle, norma ASTM D 5751

Una vez efectuado cada ciclo de envejecimiento, las probetas son sometidas a ensayo, registrando la falla de madera y la carga máxima soportada por cada probeta. Con este último dato y el área de falla (que es conocida) se obtiene fácilmente el parámetro R_{CZ} solicitado como requisito de este ensayo.

¹ Para la totalidad de las probetas

² Para el 90% de las probetas. Si alguna presenta valores cero, el ensayo debe ser rechazado.



Figura 7: Probetas para ensayo de cizalle, según norma ASTM D 5751

Los requerimientos establecidos por la norma, indican que tanto la resistencia como la falla de madera deben cumplirse en dos condiciones (grupal e individual) y están indicados en porcentaje sobre la resistencia que tiene, frente a este tipo de esfuerzo, la madera sólida a un 12% de humedad (ver tablas siguientes).

Debido a que estos porcentajes y por ende las resistencias asociadas corresponden a especies crecidas en Norteamérica, la norma señala dos métodos que pueden utilizarse para obtener la base de comparación con alguna otra especie. Uno de ellos, basado en la premisa que dos especies de densidad similar deberían tener resistencia mecánica similar, consiste en la aproximación de la densidad básica de la especie utilizada en las uniones (en este caso pino oregón) con alguna de las especies tabuladas por la norma; sin embargo, este procedimiento ha arrojado grandes diferencias en la resistencia mecánica de especies que crecen en condiciones de suelo y clima diferentes por lo que no es muy utilizado.

El otro método corresponde al utilizado en este estudio y se basa en la determinación de la resistencia de la especie utilizada, la que se obtiene a través del ensayo de cizalle en una muestra patrón (madera sólida) de 20 probetas con iguales características (forma, tamaño, humedad, etc.) que aquellas utilizadas para el ensayo de las uniones. Así, se obtiene un valor de resistencia que equivale al 100% y sobre este valor se determinan las resistencias asociadas a cada envejecimiento.

Tabla 3: Requerimientos para coníferas Norma ASTM D5751, adhesivo interior

Test	Resistencia (%)		Falla Madera (%)	
	Grupal	Individual	Grupal	Individual
Condiciones normales	60	30	60	30
Tres ciclos	30	15	30	15
Elevada Temperatura	40	20	40	20

Tabla 4: Requerimientos para coníferas Norma ASTM D5751, adhesivo exterior

Test	Resistencia (%)		Falla Madera (%)	
	Grupal	Individual	Grupal	Individual
Condiciones normales	60	30	60	30
Ebullición	50	25	50	25
Elevada Temperatura	40	20	40	20
Vacio Presión	50	25	50	25

5.2 RESULTADOS

5.2.1 Uniones dentadas - adhesivo interior

La tabla 5 presenta los resultados promedio para el ensayo de tracción, donde se observan los valores promedios de resistencia y porcentaje de falla de madera en las condiciones establecidas por la norma. De acuerdo a los valores se observa, en condiciones normales, que los requisitos de la norma en cuanto a resistencia (13,8 MPa) y porcentaje de falla madera grupal (60%) e individual (30%) son superados ampliamente.

En el test de tres ciclos, el valor de resistencia obtenido supera el requerimiento de la norma (11,0 MPa). De la misma manera, los requisitos de falla de madera son satisfechos en ambas condiciones (30% y 15% para la condición grupal e individual, respectivamente).

Tabla 5: Resultados promedio para tracción en uniones dentadas, uso interior.

Test	Resistencia (MPa)	Falla Madera (%)	
	Grupal	Grupal	Individual
Condiciones normales	32,4	93	90
Tres ciclos	33,5	59	20
Elevada Temperatura	12,3	26	5
Temperatura - humedad	14,8	43	15

Finalmente, para los test de elevada temperatura y temperatura humedad la norma establece sólo requerimiento para la resistencia, el cual es superado en ambos envejecimientos (6,9 y 5,2 MPa, respectivamente).

La tabla 6 presenta el valor promedio obtenido para el ensayo de flexión, donde se observa que los valores alcanzados superan, tanto en condición normal como en tres ciclos, los requisitos de la norma (13,8 MPa y 6,9 MPa, respectivamente). Cabe señalar que la norma no establece requerimientos de resistencia para los ciclos de elevada temperatura y temperatura humedad; por lo tanto ambos valores son también aceptables.

Tabla 6: Resistencia a la ruptura de uniones dentadas, uso interior.

Condición de ensayos	MOR (MPa)
Condición normal	48,8
Tres ciclos	44,9
Elevada Temperatura	20,3
Temperatura - Humedad	26,0

5.2.2 Uniones dentadas - adhesivo exterior

La tabla 7 presenta los resultados promedio para el ensayo de tracción, donde se observan los valores promedios de resistencia y porcentaje de falla de madera en las condiciones establecidas por la norma. De acuerdo a los valores se observa, en condiciones normales, que los requisitos de la norma en cuanto a resistencia (13,8 MPa) y porcentaje de falla madera grupal (60%) e individual (30%) son superados.

En el test de ebullición y vacío-presión, ninguno de los requerimientos (resistencia y falla de madera) son alcanzados por la muestra. Para el test de elevada temperatura, en tanto, se cumple el único requerimiento establecido por la norma (resistencia mayor a 6,9 MPa).

Tabla 7: Resultados promedio para tracción en uniones dentadas, uso exterior.

Test	Resistencia (MPa)	Falla Madera (%)	
	Grupal	Grupal	Individual
Condiciones normales	25,4	63	30
Ebullición	8,5	2	0
Elevada Temperatura	10,1	20	0
Vacio-presión	9,1	10	0

La tabla 8 presenta el valor promedio obtenido para el ensayo de flexión, donde se observa para todos los ciclos que los valores alcanzados superan el requerimiento mínimo indicado por la norma. Cabe señalar que la norma no establece requerimiento de resistencia para el test de elevada temperatura.

Tabla 8: Resistencia a la ruptura de uniones dentadas, uso exterior.

Condición de ensayos	MOR (MPa)
Condiciones normales	36,2
Ebullición	13,0
Elevada Temperatura	17,7
Vacio-presión	16,2

5.2.3 Uniones laminares – adhesivo interior

Los resultados obtenidos para el ensayo de cizalle en madera sólida (12%) de pino oregón arrojan como promedio 6,3 MPa; lo que significa que en base a este valor serán obtenidos los diferentes requerimientos de resistencia que establece la norma en el caso de evaluar uniones de este tipo. Es así como, al reemplazar los valores indicados en la tabla 3, se obtienen los requerimientos para la evaluación que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 9: Requerimientos mínimos para uniones encoladas de pino oregón, adhesivo interior

Test	Resistencia (MPa)		Falla Madera (%)	
	Grupal	Individual	Grupal	Individual
Condiciones normales	3,8	1,9	60	30
Tres ciclos	1,9	0,9	30	15
Elevada Temperatura	2,5	1,3	40	20

La tabla 10 presenta los resultados promedio obtenidos en el ensayo, donde se puede observar claramente que la resistencia es alcanzada en ambas condiciones (grupal e individual) para todos los ciclos evaluados. Respecto de la falla de madera se observa que, salvo en el test de temperatura elevada, los requerimientos grupales e individuales también son satisfechos.

Tabla 10: Resistencia promedio al cizalle, uso interior

Test	Resistencia (MPa)		Falla Madera (%)	
	Grupal	Individual	Grupal	Individual
Condiciones normales	7,4	3,3	78	50
Tres ciclos	5,1	2,8	44	20
Elevada Temperatura	3,3	1,9	33	5

5.2.4 Uniones laminares – adhesivo exterior

La tabla 11 presenta los requerimientos mínimos indicados por la norma, en base a la resistencia promedio obtenida para la madera sólida de esta especie. Paralelamente, en la tabla 12 se presentan los resultados obtenidos para la evaluación de las uniones fabricadas; donde es posible observar que en condición normal se cumple la totalidad de requisitos, tanto para la resistencia como para la falla de madera. Para ebullición y vacío-presión, no se cumple ninguno de los requerimientos de la norma y en el test de elevada temperatura, sólo se satisface el requerimiento indicado para la resistencia.

Tabla 11: Requerimientos mínimos para uniones encoladas de pino oregón, adhesivo exterior

Test	Resistencia (MPa)		Falla Madera (%)	
	Grupal	Individual	Grupal	Individual
Condiciones normales	3,8	1,9	60	30
Ebullición	3,2	1,6	50	25
Elevada Temperatura	2,5	1,3	40	20
Vacío-presión	3,2	1,6	50	25

Tabla 12: Resistencia promedio al cizalle, uso exterior

Test	Resistencia (MPa)		Falla Madera (%)	
	Grupal	Individual	Grupal	Individual
Condiciones normales	9,1	6,4	76	40
Ebullición	2,4	0,7	3	0
Elevada Temperatura	4,2	2,5	19	0
Vacío-presión	1,9	0,9	1	0

5.3 CONCLUSIONES

- El adhesivo de uso interior utilizado para la fabricación de uniones dentadas cumple la totalidad de los requisitos establecidos para los ensayos de flexión y tracción en todos los ciclos indicados por la norma ASTM D 5572.
- El adhesivo de uso exterior utilizado para la fabricación de uniones dentadas cumple en tracción la totalidad de los requisitos establecidos sólo en los ciclos de condición normal y elevada temperatura. En flexión, los resultados logrados satisfacen todos los requerimientos señalados.
- El adhesivo de uso interior utilizado para la fabricación de uniones laminares cumple la totalidad de los requisitos establecidos, con excepción de la falla de madera indicada para el test de elevada temperatura.

- El adhesivo de uso exterior utilizado para la fabricación de uniones laminares sólo cumple en condición normal todos los requerimientos indicados por la norma, mientras que en el test de elevada temperatura satisface solamente el requisito de resistencia.
- La resistencia promedio al cizalle de la madera sólida de la especie se estima en 6,3 MPa.

5.4 BIBLIOGRAFÍA

ASTM D 5572-95. Standards Specification for adhesives used for finger joints in nonstructural lumber products.

ASTM D 5751-95. Standards Specification for adhesives used for laminate joints in nonstructural lumber products.

CAPITULO VI: FABRICACIÓN DE ELEMENTOS LAMINADOS

Actualmente, las plantaciones de pino oregón en Chile superan las 14.000 ha, esto se traduce en que el año 2001 se elaboraron cerca de 34.000 m³ de madera aserrada, cuyo principal mercado fue el sector de construcción de viviendas de madera. En los próximos años, se espera un aumento de la producción de madera aserrada debido al incremento de la capacidad de producción de los principales aserraderos que procesan esta madera.

En la búsqueda de potenciales usos de este recurso forestal, el presente trabajo pretende determinar la factibilidad técnica de confeccionar vigas laminadas rectas con madera de pino oregón de acuerdo a indicaciones establecidas en la norma JAS (Japanese Agricultural Standard) para la selección, confección y ensayos de elementos laminados estructurales.

6.1 METODOLOGÍA

Los trozos utilizados en este estudio corresponden a material de raleo obtenido del Fundo Voipir³ (edad 40 años y DAP promedio de 34 cm). Cada rollizo fue aserrado, obteniendo piezas de corte mixto, las que fueron secadas artificialmente en cámara hasta lograr un contenido de humedad final de 12%.

Luego, las piezas fueron cepilladas en las cuatro caras a dimensiones finales de 22 x 120 x 3.100 mm y en seguida, agrupadas en dos calidades (primera y segunda), de acuerdo al estándar utilizado por la empresa en la definición de sus productos de madera aserrada. El criterio de selección utilizado consideró la apariencia superficial de la pieza, además de la presencia y magnitud de defectos como médula, nudos, canto muerto, grietas, mancha, entre otros.

Posteriormente, tal como lo establece la norma utilizada en este estudio (JAS), para todas las piezas se realizó una clasificación estructural visual y mecánica de las láminas y a partir de los resultados obtenidos se determinaron los productos estructurales a confeccionar. Paralelamente, en una muestra de 25 piezas seleccionadas aleatoriamente del lote se verificó el espesor y contenido de humedad.

6.1.1 Clasificación visual de grados estructurales

La norma JAS define cuatro grados estructurales visuales para la madera aserrada destinada a la confección de elementos laminados estructurales y el control de cada pieza se realiza sobre la superficie exterior, evaluando para cada característica el grado que le corresponde de acuerdo a su intensidad (ver tabla 1). Luego, la clasificación final de cada pieza corresponde al grado más crítico encontrado en alguna de las características que fueron evaluadas.

De acuerdo a la norma, para la elaboración de vigas laminadas sólo se permiten piezas clasificadas en los grados GV1, GV2 o GV3, no permitiendo elementos que sean clasificados en el rango de inferior calidad (GV4).

¹ Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Instituto Forestal – Unidad de Industrias

² Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Instituto Forestal – Unidad de Industrias

³ Propiedad de la empresa Forestal Voipir Ltda.

Tabla 1: Grados estructurales visuales

Característica	Grados estructurales visuales			
	GV 1	GV 2	GV 3	GV 4
RDN ⁴	≤ 20%	≤ 30%	≤ 40%	≤ 50%
RDNB ⁵	≤ 17%	≤ 25%	≤ 33%	≤ 50%
Inclinación de la fibra	≤ 1/16	≤ 1/14	≤ 1/12	≤ 1/8
Pudrición	No acepta			
Decoloración	Insignificante			
Fibra áspera	Insignificante			
Arqueadura	≤ 10 mm por cada 3 m de longitud			
Torcedura	≤ 10 mm por cada 3 m de longitud			
Encorvadura	≤ 5 mm por cada 3 m de longitud			
Acanaladura	Depende del espesor y ancho			
Contenido de Humedad	8 a 15%			
Variación del espesor	≤ 0,5 mm			
Partiduras, grietas y rajaduras	Muy insignificantes		Insignificantes	
Núcleo medular	No se acepta		Sin restricción	
Otros Defectos	Muy insignificantes		Insignificantes	

6.1.2 Clasificación mecánica de grados estructurales

La norma señala doce grados estructurales, los cuales se designan con el código "L XXX" donde el valor que acompaña a la letra "L" corresponde al módulo de elasticidad promedio que deben asegurar las láminas asignadas a dicha categoría. La información referente al módulo de elasticidad se obtuvo utilizando la máquina de clasificación estructural SG/AF100; y cuyo funcionamiento se muestra en la figura 1.

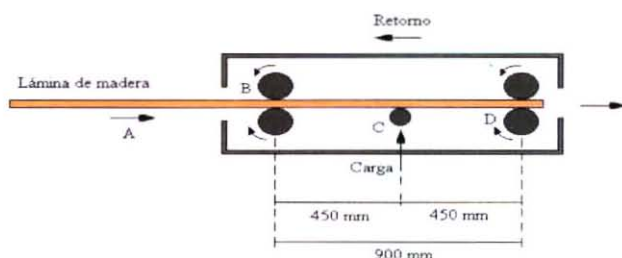


Figura 1: Descripción de la SG-AF100

La pieza circula a velocidad constante a través de todo su recorrido, manteniéndose prisionera por los rodillos giratorios B y D (presión de 1,6 bares). Cada 100 mm de desplazamiento de la madera, el PLC adherido a la máquina captura la carga requerida para obtener una deformación de 6 mm, definida previamente con un mecanismo que opera el rodillo identificado con la letra C.

Una vez que la madera ha pasado totalmente por la máquina, es devuelta a la posición de partida, iniciándose la operación y medición de la carga por la cara opuesta.

⁴ RDN (Razón de diámetro de nudos total). Se define como la razón de los nudos en la zona crítica o lugar de mayor concentración de nudos.

⁵ RDNB (Razón de diámetro de nudos de borde). Se define como la razón del mayor nudo de borde, entendiendo como nudos de borde aquellos que se disponen a una distancia menor o igual a 5 mm del canto de la pieza de madera.

Finalizada esta secuencia, el PLC promedia los valores de carga obtenidos en los dos recorridos y entrega el menor valor consignado. Este valor es el que se utiliza para determinar el módulo de elasticidad mínimo promedio y posteriormente la clasificación estructural (ver tabla 2).

Tabla 2: Grados estructurales mecánicos

Grado estructural mecánico	MOE (kg/cm^2)
L200	$\text{MOE} \geq 200.000$
L180	$180.000 \leq \text{MOE} < 200.000$
L160	$160.000 \leq \text{MOE} < 180.000$
L140	$140.000 \leq \text{MOE} < 160.000$
L125	$125.000 \leq \text{MOE} < 140.000$
L110	$110.000 \leq \text{MOE} < 125.000$
L100	$100.000 \leq \text{MOE} < 110.000$
L90	$90.000 \leq \text{MOE} < 100.000$
L80	$80.000 \leq \text{MOE} < 90.000$
L70	$70.000 \leq \text{MOE} < 80.000$
L60	$60.000 \leq \text{MOE} < 70.000$
L50	$50.000 \leq \text{MOE} < 60.000$

6.1.3 Fabricación de Vigas

Una vez clasificadas cada una de las láminas, se establece la configuración de vigas que es posible de fabricar en función de los resultados visuales y estructurales.

Las condiciones operacionales utilizadas corresponden a las recomendaciones establecidas por el fabricante del adhesivo, que en este caso corresponde a un Resorcinol Fenol Formaldehído, que se forma a partir de la mezcla de la resina líquida OXILITE 6143 y el catalizador R-6044 en proporciones 100/20 (en peso). Este adhesivo es capaz de cumplir con los requerimientos de exposición 1, asociada a ambientes agresivos que determinan que el contenido de humedad de la madera laminada permanezca por períodos prolongados de tiempo o frecuentemente por sobre el 19%.

De acuerdo a recomendaciones del fabricante, el adhesivo debe ser aplicado con un extendido de 500 g/cm^2 por línea de cola, aplicándose por ambas caras con brocha. El fraguado se produce a temperatura ambiente (15°C). Adicionalmente, se establece que la presión debe estar en el rango de $5\text{-}12 \text{ kgf/cm}^2$. Para el ensayo se utilizó una presión de 10 kgf/cm^2 .

Dicha presión, fue controlada a través de una llave de torque, y aplicada por medio de pernos y tuercas que componen una prensa de accionamiento manual (nota: el cálculo para obtener el torque necesario para cumplir con la presión recomendada se obtiene a través de las fórmulas indicadas en la norma Chilena NCh 2148 Of.89).

Las vigas laminadas estuvieron bajo presión durante 2 días y fueron sometidas a ensayos mecánicos siete días después de retirarlas de la prensa.

6.1.4 Ensayos Mecánicos

• Ensayo de bloque de cizalle

Una muestra de cada línea de cola y por cada extremo de cada elemento fueron obtenidas para la determinación del cizalle, de acuerdo a las indicaciones de la norma JAS.

La resistencia al cizalle de la muestra se calculó a través de la siguiente expresión:

$$\text{Resistencia al cizalle (Kg/cm}^2\text{)} = \frac{\text{Carga de rotura de la probeta}}{\text{Superficie de encolado}}$$

Una muestra cumple con los requisitos de la norma JAS, si su resistencia al cizalle es mayor a 72 kgf/cm² y su porcentaje de falla de madera es mayor a 65%.

• Ensayo de delaminación

Para la realización de los tres tipos de ensayos de delaminación (agua fría, agua hirviendo y vacío-presión) indicados por la norma se prepararon probetas desde cada extremo de la viga, con sus dimensiones transversales inalterables y de 75 mm de longitud.

La norma establece que la tasa de delaminación total de una muestra específica no debe exceder de 5%; y adicionalmente la delaminación en una línea de encolado debe ser menor que la cuarta parte de la longitud de ésta última. Las delaminaciones de longitud superior a 3 mm sobre cualquier línea de encolado no deben ser consideradas.

$$\text{Tasa de delaminación} = \frac{\text{Longitud total de delaminación en ambos extremos}}{\text{Longitud total de líneas de encolado en ambos extremos}} \times 100$$

• Ensayo de Flexión

El ensayo de flexión se realizó con cargas concentradas aplicadas en dos puntos simétricos con respecto al centro de la luz, según se indica en la figura 2. Según JAS, la luz debe ser al menos 18 veces la altura del elemento laminado.

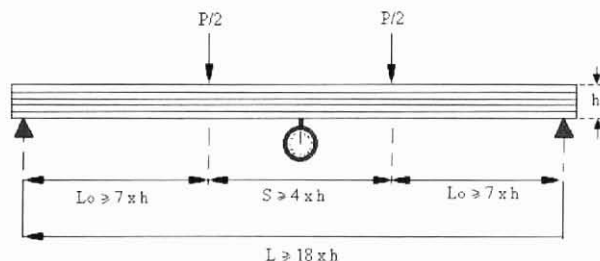


Figura 2: Esquema del ensayo de flexión

6.2 RESULTADOS

Una vez procesado el material disponible para el estudio se obtuvieron 495 piezas; las cuales corresponden a 360 láminas clasificadas como primera calidad y las restantes a segunda calidad.

El resultado del análisis de espesor y contenido de humedad de las piezas indica que ambas variables se encuentran dentro del rango permitido, encontrándose un contenido de humedad promedio de 14,6% (rango permitido entre 8 y 15%) y un espesor con variación de 0,08 mm, siendo que el máximo valor de este parámetro corresponde a 0,5 mm.

6.2.1 Clasificación visual estructural

La tabla 3 presenta los resultados de la clasificación visual de las láminas observándose, en ambas calidades, un alto porcentaje de piezas que no cumplen con ninguna de las especificaciones señaladas y por ende deben ser rechazadas. Mas aún, del total de piezas evaluadas, sólo un 2,2% (equivalente a 11 piezas, correspondientes a primera) pueden ser utilizadas en la fabricación de elementos laminados.

Tabla 3: Distribución de láminas por calidades en grados estructurales visuales

Grado estructural visual	Primera		Segunda		Total	
	Piezas	%	Piezas	%	Piezas	%
GV 1	0	0,0	0	0,0	0	0,0
GV 2	6	1,7	0	0,0	6	1,2
GV 3	5	1,4	0	0,0	5	1,0
GV 4	92	25,6	7	5,2	99	20,0
Rechazo	257	71,4	128	94,8	385	77,8
Total	360	100,0	135	100,0	495	100,0

La figura 3 muestra un resumen del total de defectos presentes que hacen que un alto porcentaje de las piezas (385) no clasifique para la confección de vigas laminadas. El defecto de mayor presencia corresponde a la decoloración, característica propia de la especie por la diferencia de color entre la albura y el duramen. Defectos como núcleo medular, fibra inclinada y RDNB no son observados.

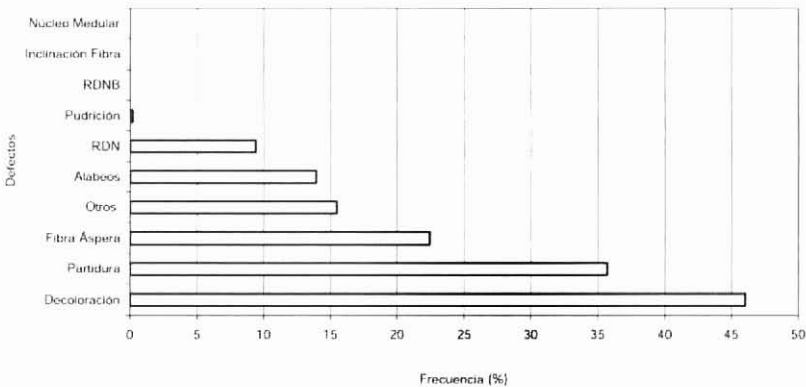


Figura 3: Características visuales de rechazo

- **Identificación de vigas laminadas factibles de confeccionar**

La variedad de vigas laminadas factibles de confeccionar, considerando sólo láminas provenientes de una clasificación visual, resulta mínima de acuerdo a lo establecido por la norma JAS. Sólo permite la elaboración de vigas del tipo homogéneas (ver figura 4), que corresponden a elementos formados con láminas de igual grado estructural.

E135 – F405	E120 – F375	E105 – F345
GV 1	GV 2	GV 3
GV 1	GV 2	GV 3
GV 1	GV 2	GV 3
GV 1	GV 2	GV 3
GV 1	GV 2	GV 3

Figura 4: Alternativas de vigas laminadas con clasificación visual

Dado los resultados obtenidos en la clasificación visual donde se obtienen 6 láminas GV2 y 5 láminas GV3, solamente es posible fabricar una viga E120-F375 y una E105-F345.

El elemento laminado posible de elaborar tiene dimensiones de 105 x 105 x 3.000 mm, compuesto por 5 láminas de 22 mm de espesor. Luego, el rendimiento obtenido por láminas y por vigas elaboradas es el siguiente:

Item	
Nº de laminas ocupadas	10
Nº de láminas totales	495
Rendimiento por láminas	2,02%
Nº total vigas laminadas	2
Volumen vigas	0,06 m ³
Volumen total de láminas (495)	4,04 m ³
Rendimiento por vigas	1,48%

6.2.2 Clasificación mecánica de grados estructurales

La tabla 4 muestra la clasificación de las láminas, sobre la base del módulo de elasticidad de cada una de éstas. En ella se observa, que un alto porcentaje de las piezas evaluadas (88,7%) alcanza los estándares japoneses para la confección de elementos laminados estructurales. Respecto de su calidad, alrededor de un 10% de las piezas, tanto de primera como de segunda, debieron ser descalificadas puesto que arrojaron valores de elasticidad menores a 70.000 kg/cm².

Tabla 4: Distribución de láminas en grados estructurales mecánicos

Grado estructural mecánico	MOE (kg/cm ²)	Primera		Segunda		Total	
		Piezas	%	Piezas	%	Piezas	%
L180	180.000 ≤ MOE < 200.000	0	0,0	0	0,0	0	0,0
L160	160.000 ≤ MOE < 180.000	0	0,0	1	0,7	1	0,2
L140	140.000 ≤ MOE < 160.000	3	0,8	2	1,5	5	1,0
L125	125.000 ≤ MOE < 140.000	15	4,2	4	3,0	19	3,9
L110	110.000 ≤ MOE < 125.000	51	14,3	19	14,5	70	14,4
L100	100.000 ≤ MOE < 110.000	62	17,4	14	10,6	76	15,6
L90	90.000 ≤ MOE < 100.000	80	22,5	24	18,3	104	21,4
L80	80.000 ≤ MOE < 90.000	64	18,0	19	14,5	83	17,0
L70	70.000 ≤ MOE < 80.000	46	12,9	27	20,6	73	15,0
Rechazo	MOE < 70.000	34	9,5	21	16,0	55	11,3
Total		355	100,0	131	100,0	486	100,0

La tabla 5 informa que de las 431 láminas asignadas a grados estructurales, 163 presentan condición de borde, las cuales deben cumplir con el grado estructural mecánico y con un requisito adicional visual de razón de diámetro de nudos de borde (RDNB).

Tabla 5: Distribución de láminas en grados estructurales mecánicos con condición de borde

Grado estructural mecánico y RDNB	MOE (kg/cm ²)	Distribución de Láminas	
		Cantidad	Porcentaje (%)
L160 + RDNB ≤ 17%	160.000 ≤ MOE < 180.000	0	0,0
L140 + RDNB ≤ 17%	140.000 ≤ MOE < 160.000	4	2,4
L125 + RDNB ≤ 17%	125.000 ≤ MOE < 140.000	14	8,5
L110 + RDNB ≤ 25%	110.000 ≤ MOE < 125.000	69	42,3
L100 + RDNB ≤ 33%	100.000 ≤ MOE < 110.000	76	46,6
Total		163	100,0

• Identificación de las vigas laminadas posibles de confeccionar

En la elaboración de vigas laminadas compuestas por láminas clasificadas en forma mecánica, es fundamental definir las zonas geométricas para establecer las calidades de cada lámina de acuerdo a la norma JAS (ver figura 4).

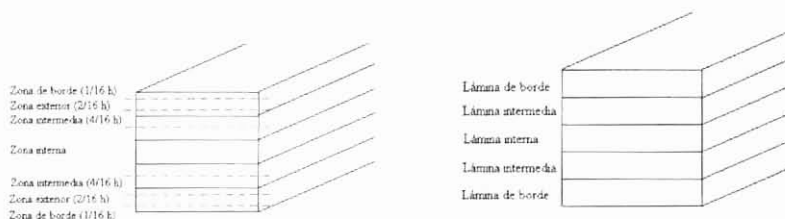


Figura 4: Definición de las zonas geométricas en una viga laminada de 5 láminas

Utilizando láminas provenientes de la clasificación estructural mecánica, es posible elaborar tres tipos de vigas laminadas definidas por la norma JAS:

Viga laminada no homogénea simétrica: Viga elaborada con láminas de diferentes grados estructurales dispuestas en forma simétrica respecto al eje central de la viga laminada.

Viga laminada no homogénea no simétrica: Viga elaborada con láminas de diferentes grados estructurales, que no se disponen en forma simétrica, sin embargo, la norma señala su constitución. Las láminas de calidad de borde se ubican en la cara flexotraccionada.

Viga laminada homogénea: Viga elaborada con láminas de igual grado estructural.

Las vigas laminadas posibles de confeccionar utilizando láminas clasificadas mecánicamente son las siguientes:

Vigas no homogéneas simétricas

E 135 – F 375	E 120 – F 330	E 105 – F 300	E 95 – F 270
L160 + RDNB ≤ 17%	L140 + RDNB ≤ 17%	L125 + RDNB ≤ 17%	L110 + RDNB ≤ 25%
L125	L110	L100	L90
L100	L90	L80	L70
L125	L110	L100	L90
L160 + RDNB ≤ 17%	L140 + RDNB ≤ 17%	L125 + RDNB ≤ 17%	L110 + RDNB ≤ 25%

Vigas laminadas no homogéneas no simétricas

E 125 – F 360	E 110 – F 315	E 100 – F 285	E 90 – F 255
L160 + RDNB ≤ 17%	L140 + RDNB ≤ 17%	L125 + RDNB ≤ 17%	L110 + RDNB ≤ 25%
L125	L110	L100	L90
L100	L90	L80	L70
L110	L100	L90	L80
L125	L110	L100	L90

Vigas Homogéneas

E 150 – F 465	E 135 – F 405	E 120 – F 375	E 105 – F 345
L160 + RDNB ≤ 17%	L140 + RDNB ≤ 17%	L125 + RDNB ≤ 17%	L110 + RDNB ≤ 25%
L160	L140	L125	L110
L160	L140	L125	L110
L160	L140	L125	L110
L160 + RDNB ≤ 17%	L140 + RDNB ≤ 17%	L125 + RDNB ≤ 17%	L110 + RDNB ≤ 25%

E 95 – F 315
L100 + RDNB ≤ 33%
L100
L100
L100
L100 + RDNB ≤ 33%

Para identificar la o las vigas laminadas a confeccionar, el criterio utilizado considera maximizar el número de unidades a producir, sin considerar en el análisis el precio de venta del producto. El resultado preliminar del ejercicio indica que los laminados E95-F270, E90-F255 y E95-F315 son posibles de fabricar en número de más de 15 unidades.

Una vez definidos los 3 elementos laminados que generan el mayor número de vigas, el procedimiento de selección consideró una segunda depuración con el objetivo de aumentar la cantidad de elementos laminados a elaborar. El procedimiento efectuado consistió en lo siguiente:

Cuando la lámina presentó un grado mecánico superior al grado más exigente de la viga a confeccionar, la lámina en referencia fue asignada a ese grado estructural. De esta manera, para los productos E95 - F270 y E90 - F255, las láminas contenidas en los grados mecánicos L160, L140 y L125 fueron asignadas al grado mecánico L110. El mismo ejercicio se realizó con el producto E95 - F315, sólo que esta vez todas las piezas clasificadas en los grados L160, L140, L125 y L110 fueron asignadas al grado mecánico L100. El resultado de este análisis se presenta en la tabla 6.

Tabla 6: Distribución de láminas en grados estructurales con límites L110 y L100

Grado estructural mecánico	MOE (kg/cm ²)	Distribución de láminas con límite L110		Distribución de láminas con límite L100	
		Cantidad	Porcentaje (%)	Cantidad	Porcentaje (%)
L110	MOE > 110.000	95	19,5	0	0,0
L100	100.000 ≤ MOE < 110.000	76	15,6	171	35,1
L90	90.000 ≤ MOE < 100.000	104	21,3	104	21,3
L80	80.000 ≤ MOE < 90.000	83	17,0	83	17,0
L70	70.000 ≤ MOE < 80.000	73	15,0	73	15,0
Rechazo	MOE < 70.000	55	11,3	55	11,3
Total		486	100,0	486	100,0

El análisis de las láminas de borde para el escenario descrito previamente, queda definido como se indica en la tabla 7.

Tabla 7: Distribución de láminas en grados estructurales con condición de lámina de borde

Grado estructural mecánico y RDNB	MOE kg/cm ²	Distribución de láminas con límite L110		Distribución de láminas con límite L100	
		Cantidad	Porcentaje (%)	Cantidad	Porcentaje (%)
L110 + RDNB ≤ 25%	> 110.000	94	55,2	-	-
L100 + RDNB ≤ 33%	100.000 ≤ MOE < 110.000	76	44,7	171	100,0
Total		170	100	171	100,0

De acuerdo con esta nueva distribución, los productos a fabricar y ensayar son los elementos laminados E95-F270, E90-F255 y E95-F315. A continuación, se detalla el número de elementos posibles de confeccionar y la distribución de las láminas que ellos presentan.

Vigas no homogéneas simétricas

Grado estructural	Composición	Cantidad de láminas		Cantidad de vigas	Observación
		Disponibles	Distribución ⁽¹⁾		
E 95 – F270	L110+ RDNB ≤ 25%	35 + 12	47	Inicial: 34	Grado superior: L110
	L90	52	52	47	Se bajaron 25 láminas:
	L70	73	73		1 lámina L160
	L90	52	52		5 láminas L140
	L110+ RDNB ≤ 25%	34 + 13	47		19 láminas L125

Vigas no homogéneas no simétricas

Grado estructural	Composición	Cantidad de láminas		Cantidad de vigas	Observación
		Disponibles	Distribución ⁽¹⁾		
E 90 – F255	L110+ RDNB ≤ 25%	69 + 25	94	Inicial: 52	Grado superior: L110
	L90	52	52	52	Se bajaron 25 láminas:
	L70	73	73		1 lámina L160
	L80	83	83		5 láminas L140
	L90	52	52		19 láminas L125

Vigas homogéneas

Grado estructural	Composición	Cantidad de láminas		Cantidad de vigas	Observación
		Disponibles	Distribución ⁽¹⁾		
E 95 – F315	L100+ RDNB ≤ 33%	16+19	35	Inicial: 15	Grado superior: L100
	L100	15+19	34	34	Se bajaron 95 láminas:
	L100	15+19	34		2 láminas L160
	L100	15+19	34		5 láminas L140
	L100+ RDNB ≤ 33%	15+19	34		19 láminas L125
					69 láminas L110

De acuerdo con esta nueva distribución, un tipo de laminado a fabricar y ensayar es el producto E90 - F255. Luego, al descontar las láminas ocupadas en la elaboración de esta viga y al considerar la segunda depuración realizada, el total de láminas L100 asciende a 119 unidades. La cantidad de vigas a confeccionar para los dos productos seleccionados se presenta a continuación:

Vigas no homogéneas no simétricas

Grado estructural	Composición	Cantidad de láminas		Cantidad de vigas
		Utilizadas	No utilizadas	
E 90 – F255	L110+ RDNB ≤ 25%	52	42	52
	L90	52	0	
	L70	52	21	
	L80	52	31	
	L90	52	0	

(1) Considera las láminas disponibles y aquellas láminas que no cumplen condición de borde pero que tienen un grado estructural mayor al que exige la norma.

Vigas homogéneas

Grado estructural	Composición	Cantidad de láminas		Cantidad de vigas
		Utilizadas	No utilizadas	
E 95 – F315	L100+ RDNB $\leq$ 33%	24	1	23
	L100	24	1	
	L100	24	1	
	L100	24	1	
	L100+ RDNB $\leq$ 33%	23	0	

De lo anterior, se tiene que el rendimiento obtenido por láminas y por cantidad de vigas elaboradas corresponde a:

Item	
Nº de laminas ocupadas	375
Nº de láminas totales	486
Rendimiento por láminas	77%
Nº total vigas laminadas	75
Volumen total 75 vigas	2,48 m ³
Volumen total de láminas (486)	3,97 m ³
Rendimiento por vigas	62 %

Nota:

Volumen lámina 22 x 120 x 3.100 mm:

0.00818 m³

Volumen viga 105 x 105 x 3.000 mm:

0.03307 m³ (compuesta por 5 láminas)

6.2.3 Fabricación de elementos laminados

De acuerdo a lo descrito anteriormente, los elementos laminados a fabricar para verificar sus grados estructurales, cada uno en 3 repeticiones, corresponden a los productos E90-F255 y E95-F315 (ver figura siguiente)

Viga no homogénea no simétrica

E 90 – F 255

L110+ RDNB $\leq$ 25%
L90
L70
L80
L90

Vigas homogéneas

E 95 – F 315

L100+ RDNB $\leq$ 33%
L100
L100
L100
L100+ RDNB $\leq$ 33%

6.2.4 Ensayos mecánicos

Con respecto a la interpretación de resultados, si el 90% de las probetas cumple las especificaciones de la norma para cada ensayo mecánico, se acepta el lote.

• Bloque de cizalle

En la tabla 8 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de bloque de cizalle, donde se observa, en promedio, para todas las vigas que los requisitos de la norma (resistencia mayor a 72 kgf/cm² y falla de madera mayor a 65%) son satisfechos.

Adicionalmente, se observa que un 91,6% del lote testeado cumple con las especificaciones; lo que indica que el ensayo es satisfactorio.

Tabla 8: Resultados del ensayo de bloque de cizalle

Viga N°	Grado Estructural	Resistencia (kgf/cm ²)	Falla madera (%)	Resultado		Total probetas
				NC	C	
1	E90-F255	104,7	86,3	0	8	8
2	E90-F255	103,2	90,1	0	8	8
3	E90-F255	108,2	72,9	3	5	8
4	E95-F315	111,0	87,4	1	7	8
5	E95-F315	98,1	90,6	0	8	8
6	E95-F315	111,0	90,6	0	8	8
Total		106,0	86,3	4	44	48

No cumple norma (NC)	8,3%
Cumple norma (C)	91,6%

• Delaminación

Los resultados de los ensayos de delaminación en ciclo de agua fría, agua caliente y vacío presión, se muestran en tabla 9; donde se observa que ninguna de las probetas presenta algún grado de delaminación. Es importante mencionar que sólo 4 probetas presentaron un grado de delaminación que no superó el 3% de las líneas de cola estudiadas; por lo que no son informadas.

Tabla 9: Resultados del ensayo de delaminación

N° Viga	Grado Estructural	Agua Fría		Agua Caliente		Vacío-Presión		Total	
		NC	C	NC	C	NC	C	NC	C
1	E90-F255	0	2	0	2	0	2	0	6
2	E90-F255	0	2	0	2	0	2	0	6
3	E90-F255	0	2	0	2	0	2	0	6
4	E95-F315	0	2	0	2	0	2	0	6
5	E95-F315	0	2	0	2	0	2	0	6
6	E95-F315	0	2	0	2	0	2	0	6
Total		0	18	0	18	0	18	0	54

No cumple norma (NC)	0,0%
Cumple norma (C)	100,0%

- **Flexión**

Durante el ensayo de flexión a escala real se determinó el módulo de elasticidad y módulo de ruptura para cada elemento laminado. En la tabla 10 se presentan los resultados experimentales y los requisitos de aceptación para cada elemento laminado, observándose que los elementos laminados cumplen, en todos los casos, los requisitos de MOE y MOR especificados en la norma JAS.

Tabla 10: Resultados del ensayo de flexión

Viga N°	Grado Estructural	Módulo de Elasticidad		Módulo de Ruptura	
		Experimental	Requisitos Promedio	Experimental	Requisito Promedio
1	E90-F255	103.441	90.000	562	255
2	E90-F255	109.041	90.000	626	255
3	E90-F255	105.193	90.000	562	255
4	E95-F315	105.550	95.000	461	315
5	E95-F315	103.029	95.000	607	315
6	E95-F315	105.051	95.000	662	315

6.2.5 Contenido de humedad

La tabla 11 presenta el contenido de humedad promedio para cada uno de los elementos testeados utilizando el Método de secado en estufa. En ella se observa, que el valor alcanzado por las muestras está dentro del rango permitido por la norma (menor o igual a 15%).

Tabla 11: Contenido de humedad de los elementos laminados

Viga N°	Grado Estructural	Contenido de Humedad (%)
1	E90-F255	13,5
2	E90-F255	14,3
3	E90-F255	13,9
4	E95-F315	14,1
5	E95-F315	14,2
6	E95-F315	13,9
Promedio		13,9

6.3 CONCLUSIONES

- Los resultados de la clasificación estructural en forma visual muestran que sólo un 2,2% de las láminas cumple con los requisitos de los grados estructurales visuales permitidos en la fabricación de elementos laminados (GV1, GV2 y GV3), mientras que el 77,8% de las láminas no cumple con las especificaciones. El alto porcentaje de rechazo se debe principalmente a decoloración (46%), característica propia de la especie.
- Los elementos laminados factibles de confeccionar, considerando sólo láminas provenientes de una clasificación visual, resultan mínimos porque la norma JAS sólo permite la elaboración de elementos laminados del tipo homogéneo. Lo anterior, sumado a los malos resultados de la clasificación estructural en forma visual, causa la baja cantidad de

elementos factibles de confeccionar (2 elementos laminados), lo que se traduce en un bajo rendimiento volumétrico que sólo alcanza un 1,5%.

- Los resultados de la clasificación estructural mecánica presentan una disminución del porcentaje de rechazos (11,3%) en comparación a la clasificación visual.
- De acuerdo a los resultados de la clasificación estructural en forma mecánica y al análisis de identificación del elemento laminado que maximiza el número de unidades a producir, los grados estructurales E90-F255 y E95-F315, presentan los mejores resultados con un rendimiento de piezas ocupadas en la confección de los elementos laminados de 77% y un rendimiento volumétrico en cuanto a vigas elaboradas de 62%.
- Los ensayos realizados a la unión adhesiva son satisfactorios. La resistencia al cizalle alcanzó en promedio 106 kgf/cm^2 y un 86,3% de falla de madera. En resumen, el 91,6% de las probetas ensayadas cumple con las especificaciones de la norma.
- Frente a los ciclos de envejecimiento acelerado, la unión adhesiva presenta excelentes resultados, no registrándose delaminaciones para ninguno de los ciclos evaluados.
- Los resultados de los ensayos de flexión a los grados estructurales E90-F255 y E95-F315 son satisfactorios. Los valores del MOE cumplen con los requisitos del valor promedio; mientras que para el MOR, los requisitos promedios son ampliamente satisfechos.
- El contenido de humedad promedio de las vigas laminadas fue de 13,9%, cumpliendo con el requisito de la norma.

6.4 BIBLIOGRAFÍA

INFOR, 2000. Manual de interpretación de la norma japonesa para la fabricación de productos de madera laminada estructural. Manual N° 28. Santiago, Chile.

CAPITULO VII: PROPIEDADES DE REACCIÓN AL FUEGO

La pirólisis corresponde al fenómeno por el cual, la madera se descompone frente al calor, produciendo gases y vapores, muchos de ellos combustibles que al combinarse con el aire (oxígeno) generan llamas y humos. El calor producido en la combustión, a causa de las reacciones químicas exotérmicas que se producen, hace mantener la combustión indefinidamente, mientras exista aire y madera involucrada.

La descomposición pirolítica de la madera empieza paulatinamente antes de los 200°C y concluye prácticamente a los 500°C; observándose claramente cuatro etapas diferentes:

- a) Antes de los 100°C : Evaporación de humedad.
- b) Alrededor de los 250°C : Formación de gases combustibles (monóxido de carbono) y gases incombustibles (dióxido de carbono), además de vapores de ácido acético y alquitranes.
- c) Sobre los 300°C : Carbonización de la madera y producción de hidrocarburos, alquitranes y alcoholes (mayor cantidad de gases combustibles).
- d) Sobre los 500°C : Carbón residual.

En resumen, la combustión de la madera es un conjunto de complejas reacciones químicas en presencia de aire, automantenidas en cadena a causa de la pirólisis y por el calor producido de las reacciones exotérmicas involucradas en el proceso.

Los materiales de construcción, como la madera aserrada o los tableros estructurales, pueden estar sometidos a la acción de un incendio y, de acuerdo a su comportamiento, pueden retardar, en mayor o menor medida, por un lapso determinado de tiempo la acción de las llamas, protegiendo la estructura.

El comportamiento al fuego de materiales y elementos constructivos se puede determinar mediante métodos de evaluación a través de ensayos que definen un conjunto de condiciones muy similares a las reales; simulando las temperaturas que se producen en condiciones reales y donde lo que se evalúa es la misión o solicitud que deberá cumplir el material o elemento.

En la fase inicial de un incendio, las propiedades más importantes son aquellas que tienen relación con la reacción al fuego de los materiales. La evaluación de las propiedades se realiza respecto al aporte que hacen los materiales al incendio. La reacción al fuego representa la contribución de un material de construcción al inicio y crecimiento de un incendio, es decir, el "alimento" que ese material proporciona al fuego.

Basado en lo anterior, el objetivo de este estudio pretende determinar las propiedades de reacción al fuego que tiene la madera sólida y algunos productos reconstituidos con madera de pino oregón.

¹ Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Instituto Forestal – Unidad de Industrias

² Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Instituto Forestal – Unidad de Industrias

7.1 METODOLOGÍA

En este estudio se utilizó madera sólida de pino oregón, además de tableros encolados de canto y OSB fabricados con la especie en referencia. Adicionalmente, se incorporaron los resultados obtenidos de ensayos realizados a madera sólida de pino radiata (*Pinus radiata* D.Don), eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y tableros OSB confeccionados con especies nativas.

Los ensayos se realizaron en un cono calorimétrico, equipo que mide propiedades de reacción al fuego y opera de acuerdo a la metodología establecida en la Norma ISO 5660-1, el cual está ubicado en el Laboratorio de Fuego del Instituto Forestal, sede Bio-Bío.

Este equipo utiliza un método de ensayo que se basa en el principio de que el calor neto de combustión es proporcional a la cantidad de oxígeno requerido para dicha combustión. La relación es de aproximadamente 13,1 KJ de calor liberado por cada gramo de oxígeno consumido en la combustión de sólidos orgánicos. El método consiste en medir la tasa de flujo de masa de oxígeno consumido en la combustión para determinar la tasa de calor liberado real. Este aparato utiliza una fuente radiante para proporcionar un flujo de calor constante a la muestra de ensayo.

Las pruebas se hicieron en orientación horizontal, con un flujo de calor incidente de 50 kW/m^2 sobre probetas con sección transversal de $100 \times 100 \text{ mm}$ y un espesor entre 10 y 15 mm. La disposición de las probetas al momento de ejecutar los ensayos corresponde a la mostrada en la figura 1.

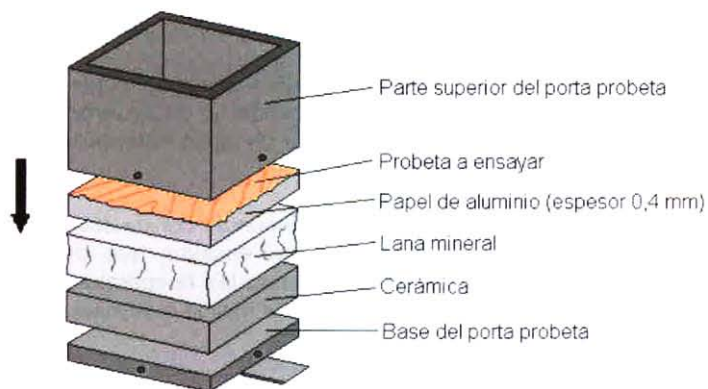


Figura 1: Disposición de la probeta para ensayo

Las probetas fueron ensayadas en triplicado a un 10% de contenido de humedad y las principales características de los materiales ensayados se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Características de los productos ensayados

Producto	Especificación	Espesor (mm)	D _{10,10} (kg/m ³)
Madera sólida			
Eucalipto (EU)	Latifoliada, sin defectos, cepillada	15	825
Pino radiata (PR)	Conífera, sin defectos, cepillada	12	390
Pino oregón (PO)	Conífera, sin defectos, cepillada	10	520
Tableros			
Encolado de canto (ENC-PO)	Tablero de listones de madera sólida encolado de canto hecho con pino oregón	10	520
OSB Nativo (OSB-NAT)	Tablero de hojuelas orientadas fabricado a partir de maderas nativas; coigue y roble	11,1	670
OSB 100% oregón (OSB-PO)	Tablero de hojuelas orientadas fabricado a partir de madera de pino oregón	11,1	670
OSB Combi (OSB-COM)	Tablero de hojuelas orientadas fabricado a partir de maderas nativas (coigue y roble) en el centro y madera de pino oregón en las caras	11,1	670

7.1.1 Determinaciones realizadas

Tiempo de ignición (s): Tiempo que tarda un material en producir llama sostenida una vez que es expuesto a un determinado flujo de calor y fuente de ignición.

Tasa de pérdida de masa (g/s): Indica la rapidez de degradación física del material cuando se descompone frente al calor.

Tasa de calor liberado (kW/m²): Cantidad de calor (energía) que emite un material al combustionarse. Es la variable que describe en mejor forma el grado de combustibilidad debido a que representa la contribución de un material al crecimiento del fuego.

Calor efectivo de combustión (MJ/kg): Es la cantidad de calor liberado por unidad de masa. Con el calor efectivo de combustión se asume una completa combustión, o sea, no se produce monóxido de carbono.

Densidad de humos (m²/kg): El término humos es usado para definir la mezcla de productos de la pirólisis y aire presentes en un incendio. Se expresa a través del área específica de extinción, parámetro relacionado con la opacidad de los humos y su transmitancia.

Producción de CO (ppm) y CO₂ (%): corresponde a la cantidad de monóxido de carbono y dióxido de carbono generados durante la combustión del material.

Punto de flashover (s): El fenómeno del flashover o punto de encendido generalizado corresponde a una inflamación generalizada en la etapa de desarrollo de un incendio. Es el punto crítico donde el fuego comienza a comprometer la estabilidad estructural del recinto donde se ha originado este fenómeno. La curva del desarrollo de un incendio a lo largo del tiempo se muestra en la figura 2.

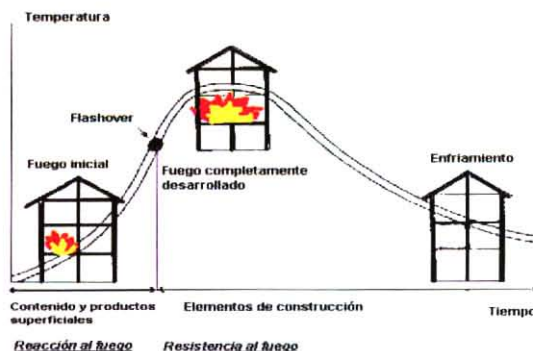


Figura 2: Inicio y desarrollo de un incendio; punto de flashover

Mediante una fórmula de correlación entre el ensayo de esquina, llamado "Room Corner Test", descrito en la norma internacional ISO 9705 y los datos que entrega el cono calorimétrico, se puede obtener el tiempo de flashover de un material. La variable considera propiedades físicas del material y parámetros de calor del cono calorimétrico.

$$t_{fo} = a \frac{t_{ig}^{0.25} \cdot \rho^{1.72}}{A^{1.30}} + b$$

t_{fo} : Tiempo para el flashover en ensayos de la sala de fuego, (s)

t_{ig} : Tiempo de ignición en el cono calorimétrico a 50 kW/m², (s)

A : Liberación total de calor hasta 5 minutos después de la ignición a 50 kW/m² (THR₃₀₀), (MJ/m²)

ρ : Densidad, (kg/m³)

a : Constante, 0,0717 (J/m²)^{1,30} (kg/m³)^{-1,72} (s)^{0,75}

b : Constante, 56,6 (s)

7.2 RESULTADOS

La tabla 2 presenta los resultados promedio de los ensayos realizados a las probetas de madera sólida, para todas las variables evaluadas. Las variables TPM, TCL y CEC corresponden a los datos a partir del segundo de la ignición del material hasta el término del ensayo; en tanto, las variables AEE, PCO y PCO₂ consideran los datos desde el inicio del ensayo hasta la finalización de éste.

De acuerdo a los resultados presentados, se observa que la madera de eucalipto presenta el mayor tiempo de ignición, seguido del pino oregón y del pino radiata, respectivamente. Lo anterior concuerda con la tendencia esperada, puesto que a medida que la densidad del material aumenta, el valor de este parámetro también se incrementa.

Respecto de la tasa de pérdida de masa, los resultados indican que la degradación del pino oregón es más lenta que las demás; sin embargo, las diferencias no son significativas entre las diferentes especies ensayadas.

Tabla 2: Resultados promedio evaluación muestras de madera sólida

Parámetros	Unidad	EU	PR	PO
Tiempo de ignición (TI)	s	32	11	17
Tasa de pérdida de masa (TPM)	g/s	0,06	0,05	0,04
Tasa de calor liberado promedio (TCL)	kW/m ²	90	74	79
Tasa de calor liberado peak (TCL _{peak})	kW/m ²	228	240	168
Calor efectivo de combustión (CEC)	MJ/kg	13	13	17
Area específica de extinción (AEE)	m ² /kg	65	102	90
Producción de CO (PCO)	ppm	21,7	59,4	45,3
Producción de CO ₂ (PCO ₂)	%	0,26	0,27	0,29

La tasa de calor liberado promedio obtenida por la madera de pino oregón es similar a la alcanzada por la madera de pino radiata y, ambas, presentan menores valores que los niveles mostrados por la madera de eucalipto. Adicionalmente, la madera de pino oregón presenta el menor peak en la TCL, entre todos los materiales ensayados. Esto significa que la especie libera su energía calorífica en forma menos explosiva, lo cual representa, en caso de incendio, menor riesgo para los ocupantes del recinto.

El calor efectivo de combustión de la madera de pino oregón es superior a la alcanzada por la madera de pino radiata y eucalipto. Los niveles alcanzados por todas las muestras están dentro del comportamiento esperado para maderas.

Los niveles de densidad de humos de las dos especies coníferas ensayadas son superiores a los niveles alcanzados por la madera de eucalipto. Similar comportamiento se observa en los parámetros de producción de monóxido y dióxido de carbono.

Cabe señalar que de acuerdo a lo informado por OSHA¹, los niveles de CO₂ alcanzados por las muestras están muy por debajo de los límites establecidos para generar algún tipo de complicación en la salud de las personas (ver tabla 3). Respecto del CO, se observa que ambas coníferas alcanzan valores que superan el límite de tolerancia para 1 hora de trabajo, sin embargo, están muy por debajo del siguiente nivel.

Tabla 3: Efecto gases de la combustión, CO y CO₂

Gases	Concentración	Efecto
Monóxido de carbono	35 ppm	Límite de tolerancia durante 1 hora de trabajo
CO (tóxico)	1000 ppm	Dolor de cabeza, náusea y vértigo después de 20 min
	1600 ppm	Pérdida de conciencia después de 20 min
Anhidrido carbónico	2%	Aumenta el pulso en un 50%
	3%	Aumenta el pulso en un 100%
CO ₂	5%	Respiración difícil

La tabla 4 presenta los resultados de las variables para la evaluación en los diferentes tipos de tableros, donde es posible observar que la muestra ENC-PO arroja un menor tiempo de ignición, debido a la menor densidad que ésta presenta. Para el resto de las muestras, no se observan diferencias significativas, puesto que sus densidades son también bastante similares.

¹ Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor.

Respecto de la tasa de pérdida de masa, se observa que el menor valor se obtiene para la muestra ENC-PO. Para los tableros OSB, independiente de su constitución, los valores de este parámetro son bastante homogéneos y mayores que el encontrado para el tablero de madera sólida. Lo anterior se justifica por la cantidad de adhesivo presente en las muestras que, sin duda, contribuye a acelerar su degradación.

La tasa de calor liberado promedio obtenida por la muestra ENC-PO es considerablemente menor a la alcanzada por los tableros OSB, independientes de su constitución. Entre los tableros OSB, la muestra OSB-PO alcanza el menor peak en la variable TCL; lo que indicaría el menor grado de combustionabilidad de las muestras fabricadas con pino oregón.

Tabla 4: Resultados promedio evaluación muestras de tableros de madera

Parámetros	Unidad	ENC-PO	OSB-NA	OSB-PO	OSB-COM
Tiempo de ignición (TI)	s	13	19	20	19
Tasa pérdida de masa (TPM)	g/s	0,07	0,10	0,09	0,09
Tasa de calor liberado prom. (TCL)	kW/m ²	100	151	126	121
Tasa calor liberado peak (TCL _{peak})	kW/m ²	182	317	257	276
Calor efect. combustión (CEC)	MJ/kg	12	13	12	11
Area esp. de extinción (AEE)	m ² /kg	53	355	75	81
Producción de CO (PCO)	ppm	12,4	31,2	26,3	19,6
Producción de CO ₂ (PCO ₂)	%	0,26	0,38	0,35	0,34

Para el calor efectivo de combustión, no se observan diferencias significativas entre los diferentes tipos de tableros.

Los tableros elaborados con madera de pino oregón presentaron niveles inferiores en la variable densidad de humos, comparado al nivel obtenido por el tablero OSB fabricado con maderas nativas. Similar comportamiento se observa en los parámetros de producción de CO y CO₂.

Es importante señalar, que en todos los casos, los niveles de CO y CO₂ alcanzados están por debajo de los límites máximos que influyen en alguna medida en la salud de las personas (ver tabla 3).

La figura 3 muestra el tiempo de flashover para las diferentes muestras evaluadas. En ella es posible observar que el mayor valor de este parámetro se obtiene para la madera sólida de eucalipto; en tanto, el menor tiempo se observa para la muestra de pino radiata.

Cabe mencionar que la madera sólida de pino oregón y todos los productos elaborados a partir de esta especie presentaron tiempos bastante similares entre sí, siendo el tablero OSB Combi quien alcanzó el mayor valor, situación que se explica, en parte, por la presencia de madera nativa en el tablero.

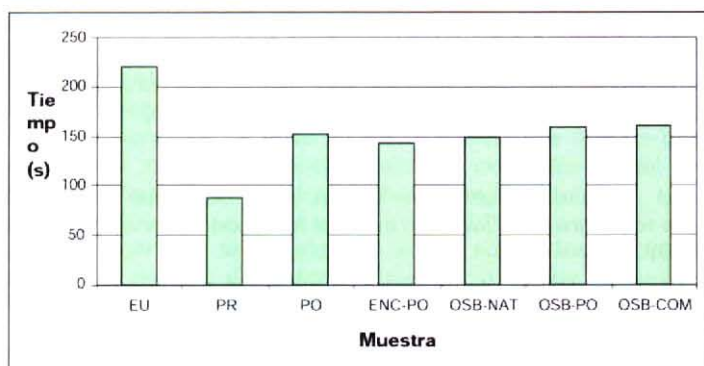


Figura 3: Tiempo de flashover para las diferentes muestras evaluadas

7.3 CONCLUSIONES

La madera de pino oregón y sus productos derivados presentan un comportamiento frente al fuego que se encuentra dentro del rango esperado para productos de origen celulósico.

El comportamiento general de la madera sólida de pino oregón indica que al ser comparada con pino radiata no existen grandes diferencias. A pesar de lo anterior, los resultados indican que el pino oregón tarda mayor tiempo en encender y además alcanza un menor peak en la tasa de calor liberado, lo que implica una menor posibilidad de liberar el calor en forma explosiva frente a las condiciones de un incendio.

El comportamiento general de los tableros OSB, indica que aquellos fabricados con pino oregón (en alguna proporción) alcanzan mejores propiedades que aquellos fabricados solamente con madera nativa.

Los productos de madera de pino oregón presentaron tiempos de flashover inferiores a los 3 minutos; pero superiores a los obtenidos para el pino radiata.

Los materiales ensayados presentan niveles de humos y toxicidad de los gases que no tienen efectos nocivos para las personas.

7.4 BIBLIOGRAFÍA

ISO 5660 – 1, Fire tests – Reaction to fire – Rate of heat release from building products, International Organization for Standardisation. 1993.

ISO 9705. Fire tests – Full scale room test for surface products. International organisation for standardisation. 1990.

Östman, Birgit and Tsantadiris, Lazaros. Correlations between cone calorimeter data and time to flasfover in the room fire test. Swedish institute for wood Technology Research, Träteknik report I 9306024 (1993).

Contador, Patricia. Cone calorimeter tests of wooden products from Chile. Swedish institute for wood Technology Research, Träteknik report 9712097 (1997).

Tsantadiris, Lazaros. Cone calorimeter data for the EURIFIC products using and not using a retainer Frame. Swedish institute for wood Technology Research, Träteknik report P9208054 (1992).

Östman, Birgit and Tsantadiris, Lazaros. Smoke data from the cone calorimeter for comparison with the room fire test. Swedish institute for wood Technology Research, Träteknik report I 9306024 (1993).

CAPITULO VIII: REVESTIMIENTOS

La masificación del uso de la madera con propósitos arquitectónicos y la gran variedad de especies maderables utilizadas, cada una con características propias, ha permitido desarrollar industrias relacionadas que apoyan el uso apropiado de la madera en la construcción. Es el caso de la industria de los revestimientos que ha desarrollado una variedad de productos, que se diferencian entre sí dependiendo del uso final y del ambiente, interior o exterior, en que estará expuesta la madera.

Los revestimientos orgánicos son aplicados sobre superficies de madera con tres propósitos: proteger la madera del deterioro, mejorar o realzar su apariencia, y cubrir defectos superficiales naturales de la madera.

Dado que no existen estudios que informen sobre sistemas de protección para madera de pino oregón, el presente trabajo tiene como finalidad determinar el mejor sistema de protección "revestimiento-madera", para uso exterior, que se comercializa en el mercado nacional.

8.1 METODOLOGÍA

La primera fase del estudio consistió en seleccionar los productos a evaluar; considerando las siguientes características: libres de pigmentos o incoloros, con protección UV, resistencia a la intemperie, con y sin formación de película. En la tabla 1 se identifican los productos seleccionados.

Tabla 1: Características de los productos seleccionados

Propiedades de los revestimientos		Identificación	Nombre comercial	Características del producto
Incoloros y de uso exterior	Con formación de película	Producto 1	SHER PROOF barniz	Producto soluble en agua, satinado, de secado rápido y resistente a la intemperie.
		Producto 2	BARNIZ MARINO barniz	Producto de alto brillo, antihongos y con filtro solar.
	Sin formación de película	Producto 3	MAD&SON stain	Producto oleoso, preservante, insecticida y fungicida.
		Producto 4	XYLADECOR stain	Producto oleoso, protector biológico, actúa preventivamente contra rayos UV, evita la rápida circulación de agua causante de deformaciones.

¹ Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Instituto Forestal – Unidad de Industrias

² Ingeniero de Ejecución en Maderas, Asesor externo

Posteriormente, se prepararon las probetas acondicionándolas a 12% de humedad y cepillando todas sus caras. Se seleccionaron probetas de corte radial y tangencial, todas libres de defectos y con dimensiones de 10 x 75 x 150 mm.

La aplicación de los productos se realizó con brocha, en dos aplicaciones dejando transcurrir 24 horas, entre aplicaciones, de acuerdo a recomendaciones de los fabricantes de estos productos.

La cantidad de probetas fue determinada de acuerdo con la capacidad de la cámara de envejecimiento. Según esto, el ensayo se realizó en dos cargas (34 probetas cada una). En la primera de ellas se expusieron los productos que forman película y en la segunda los productos que no la forman. Además de las probetas pintadas, 2 probetas testigo, por cada carga, fueron instaladas en la cámara. En la tabla siguiente se detalla la distribución de probetas por producto a evaluar.

Tabla 2: Distribución de probetas por producto a evaluar

Carga	Producto	Número y tipo de probetas
Con formación de película	Producto 1	8 Radiales
		8 Tangenciales
	Producto 2	8 Radiales
		8 Tangenciales
Sin formación de película	Producto 3	8 Radiales
		8 Tangenciales
	Producto 4	8 Radiales
		8 Tangenciales

8.1.1 Determinaciones realizadas a los productos

Para evaluar el comportamiento de los recubrimientos frente a los efectos de la luz solar y el agua lluvia o rocío se realiza un ensayo de envejecimiento acelerado, que consiste en simular en forma extrema los efectos ambientales en cámaras con equipos fluorescentes UV y sistemas de condensación de agua.

Los ensayos se realizaron bajo las especificaciones de la norma ASTM G 53: "Operación de equipos con exposición de luz y agua (fluorescente UV y condensación) para materiales no metálicos".

El equipo de exposición a envejecimiento acelerado o cámara UV empleado en estas experiencias, cuenta en su interior con 8 lámparas fluorescentes UV, del tipo FS-40, que irradian la fracción de luz UV en el espectro visible, alcanzando el 100% de intensidad en 313 nanómetros (nm) y el 1% en 280 (nm). La condensación, en tanto, se logra exponiendo la superficie a evaluar a una mezcla de aire y vapor de agua, que se genera en la parte inferior de la cámara, a través de un depósito calefaccionado que contiene agua destilada.

Las condiciones de operación de la cámara fueron reguladas en combinaciones de ciclos de 4 horas de luz UV, a una temperatura de 60 °C, seguidos de 4 horas de condensación a una temperatura de 40 °C.

La periodicidad con que se realizaron los controles fue menor a 168 horas, hasta alcanzar 800 horas de exposición, tiempo en que se detuvo el ensayo al no observarse efectos de deterioro entre dos controles sucesivos. La siguiente tabla indica las evaluaciones realizadas, por carga, a cada uno de los productos aplicados.

Tabla 3: Evaluaciones a los revestimientos

Evaluación y/o Norma	Carga 1	Carga 2
ASTM D523: Test de brillo especular	✓	✓
ASTM D660: Test para evaluar el grado de agrietamiento de la película de pintura	✓	✗
ASTM D661: Test para evaluar el grado de rajadura de la película de pintura	✓	✗
ASTM D662: Test para evaluar el grado de erosión de la película de pintura	✓	✗
ASTM D714: Test para evaluar el grado de ampollas en la película de pintura	✓	✗
ASTM D772: Test para evaluar el grado de descascarado en la película de pintura	✓	✗
ASTM D3359: Test para medir la adhesión, test de cinta adhesiva	✓	✗
Variación de peso	✓	✓
Control de acanaladura	✓	✓
Variación de color	✓	✓

8.2 RESULTADOS

8.2.1 Productos que forman película

Variación del brillo: Los valores de brillo se determinan por el porcentaje de un haz de luz que se refleja sobre una superficie.

En las figuras 1-A y 1-B se observa que el comportamiento del brillo difiere entre productos y tipos de cortes en la madera. Es así como, para el producto 1, con características de bajo brillo, el comportamiento indica que éste no fue afectado en forma significativa por el proceso de envejecimiento acelerado, manteniendo una relativa estabilidad en el tiempo.

En el producto 2, con características de alto brillo, se pierde un 25% del brillo inicial durante las primeras 168 horas de exposición. En posteriores controles las pérdidas no son significativas.

La diferencia de brillo entre los productos 1 y 2 es sólo función de su formulación, pudiéndose variar el brillo por medio de aditivos o resinas.

La diferencia de brillo entre cortes de madera, radial y tangencial, indica que los productos tienen un mejor comportamiento sobre un sustrato más homogéneo, como es el corte tangencial, que tiene una distribución celular más ordenada.

La figura 1-C, que describe el comportamiento de las probetas testigo, señala el bajo brillo natural de la madera en estudio, la cual sin un recubrimiento tiene un brillo similar en ambos cortes. Se observa, además, un descenso del brillo durante las primeras horas de exposición, provocado principalmente por la radiación UV.

Finalizada la exposición de los productos 1 y 2 bajo análisis, no se observaron grietas superficiales, grietas en el sustrato, erosión, ampolladuras, así como tampoco descascarado.

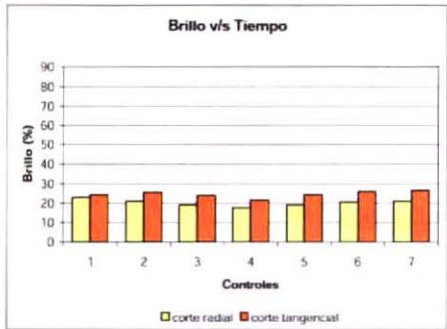


Figura 1-A: Producto 1

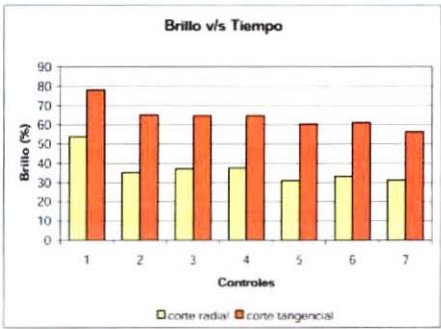


Figura 1-B: Producto 2

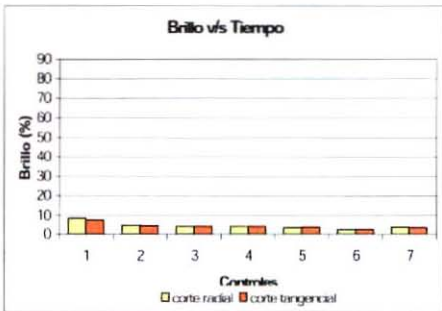


Figura 1-C: Probetas testigos

Adherencia: Esta prueba mide el área de película afectada por desprendimiento, evaluado por el método de la cinta adhesiva. Este ensayo se realiza sobre la cara expuesta al envejecimiento acelerado y sobre la trascara, evaluando de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 4: Escala de evaluación para la adherencia

Grado de adherencia	Desprendimiento
5B	Sin desprendimiento o sólo bordes afectados
4B	Menos del 5% del área afectada
3B	Área afectada entre 5 y 15%
2B	Área afectada entre 15 y 35%
1B	Área afectada entre 35 y 65%
0B	Área afectada mayor a un 65%

En las figuras 2-A y 2-B, se observa que para las probetas de corte tangencial no existen diferencias en el comportamiento de uno u otro producto, sin embargo, en aquellas de corte radial el producto 1 presenta un mejor comportamiento.

La diferencia de adherencia entre los cortes radial y tangencial es producto de la diferente disposición de los elementos anatómicos de la madera, siendo más ordenados y homogéneos en el sentido tangencial, otorgando una mejor superficie de adherencia al revestimiento.

El comportamiento en la trascara indica que la adherencia no es afectada en ninguno de los casos. Es así como, la adherencia obtenida en ambos tipos de productos y para ambos tipos de corte alcanza el mayor grado de adherencia (5B) en todas las probetas evaluadas.



Figura 2-A: Producto 1

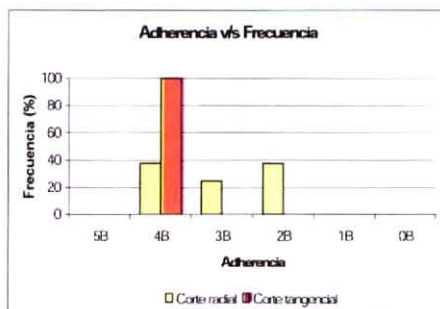


Figura 2-B: Producto 2

Variación de peso: La variación del peso de las probetas durante el ensayo depende del tipo de película que forma el revestimiento. Una película sólida no permite la libre circulación de agua, en cambio una del tipo poro semi abierto permite un cierto intercambio de humedad con el ambiente.

Las figuras 3-A y 3-B muestran que el peso de las probetas recubiertas con los productos 1 y 2, en ambos cortes, no se ve afectado por las variaciones de humedad de los ciclos del ensayo de envejecimiento acelerado.

En las tres figuras se observa una pérdida inicial de peso, producto del acondicionamiento que sufre la madera al ser sometida a las condiciones de operación de la cámara de envejecimiento acelerado.

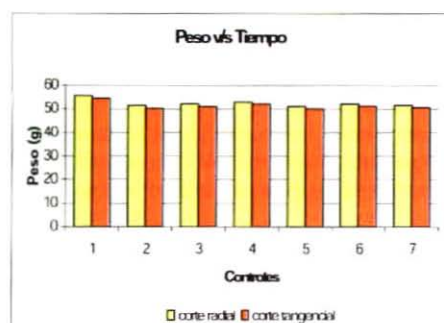


Figura 3-A: Producto 1

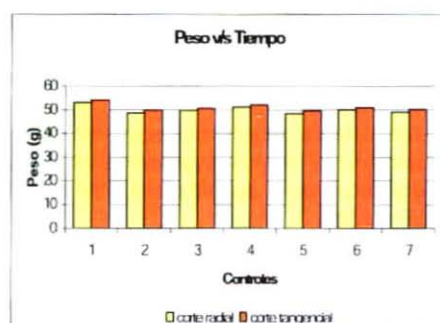


Figura 3-B: Producto 2

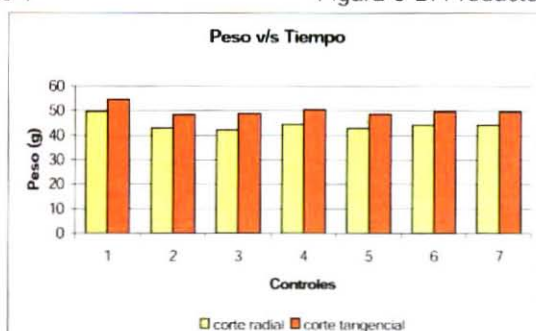


Figura 3-C: Probetas testigo

Control de la acanaladura: En general, con este control se define el número de probetas que presentan el alabeo denominado "acanaladura", como consecuencia de su exposición a condiciones de clima controlado. La siguiente tabla resume los resultados obtenidos en este control; donde se observa la presencia de este defecto exclusivamente en probetas tangenciales, para ambos productos. Entre productos, no se observan diferencias en el comportamiento de las muestras.

Tabla 5: Resultados del control acanaladura

Tipo de corte	Producto 1		Producto 2	
	Promedio (mm)	Frecuencia (%)	Promedio (mm)	Frecuencia (%)
Radial	0	0	0	0
Tangencial	1,5	40	1,5	40

Variación de color: El efecto más evidente de deterioro de la madera cuando se expone a condiciones climáticas es el cambio de color.

Las tablas 5-A y 5-B resumen los resultados obtenidos, donde se observa que al término del ensayo no existe una diferencia de color final significativa entre productos. La degradación química sufrida por la madera se aprecia en el drástico cambio de color. Inicialmente, las probetas presentaron colores más intensos, como se puede apreciar en los valores de cada color.

Tabla 5-A: Variación de color en probetas con el producto 1

Tipo de corte	Producto 1	
	Color inicial	Color final
Radial	Rojo=255 Verde=201 Azul=125	Rojo=136 Verde=51 Azul=18
Tangencial	Rojo=253 Verde=168 Azul=98	Rojo=133 Verde=54 Azul=20

Tabla 5-B: Variación de color en probetas con el producto 2

Tipo de corte	Producto 2	
	Color inicial	Color final
Radial	Rojo=255 Verde=204 Azul=118	Rojo=128 Verde=43 Azul=12
Tangencial	Rojo=255 Verde=183 Azul=75	Rojo=131 Verde=46 Azul=28

8.2.2 Productos que no forman película

Variación del brillo

Las figuras 5-A, 5-B y 5-C muestran los resultados obtenidos para esta evaluación. Una vista general de los gráficos nos muestra el leve aporte de brillo a la madera por parte de los productos evaluados. La característica principal de los productos que no forman película es la penetración superficial de la madera, por lo que no aportan brillo en forma significativa.

De los dos productos evaluados, el producto 3 es el que aporta más brillo, esto se explica por la composición oleosa de este producto que permanece en la superficie de la madera por más tiempo.

Ambos productos perdieron brillo durante las primeras 168 horas de exposición. Posteriormente, el comportamiento se mantiene estable, a niveles bajos, que hacen difícil su cuantificación con instrumentos.

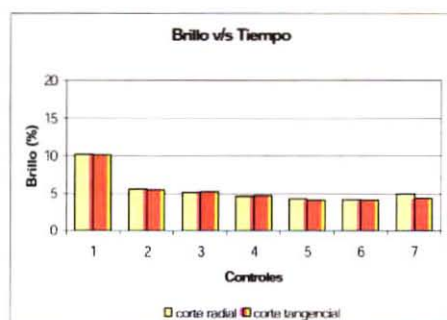


Figura 5-A: Producto 3

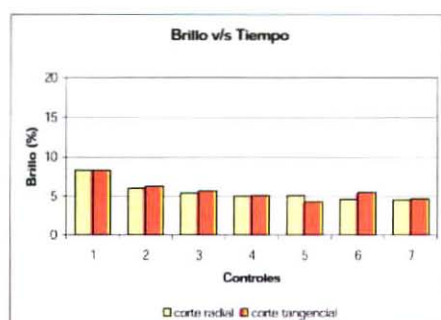


Figura 5-B: Producto 4

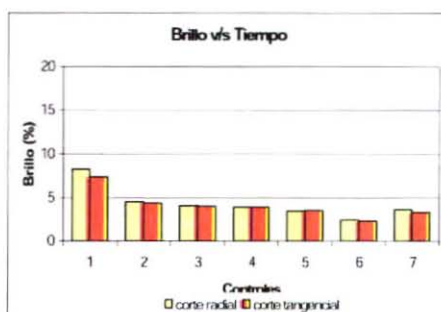


Figura 5-C: Probetas testigo

Variación del peso

La variación de peso en las probetas pintadas con productos que no forman película fue similar a los productos que sí la forman. Las figuras 6-A, 6-B y 6-C grafican los resultados; mostrando que ambos productos permiten el intercambio de humedad entre el medio ambiente y la madera, disminuyendo levemente su peso entre los diferentes controles.

La pérdida inicial de peso es provocada por el acondicionamiento que sufre la madera al ser sometida a las condiciones de operación de la cámara de envejecimiento acelerado.

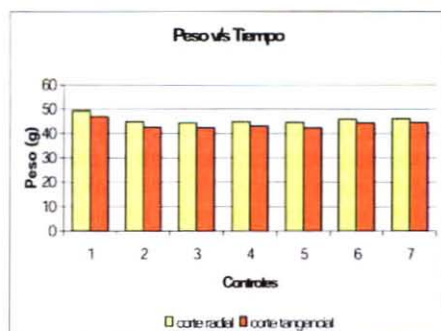


Figura 6-A: Producto 3

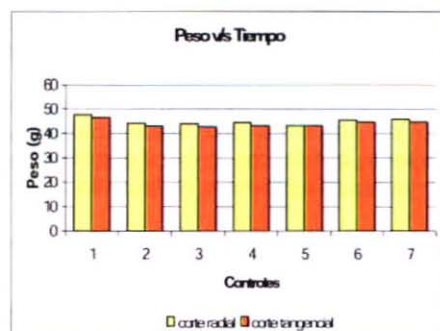


Figura 6-B: Producto 4

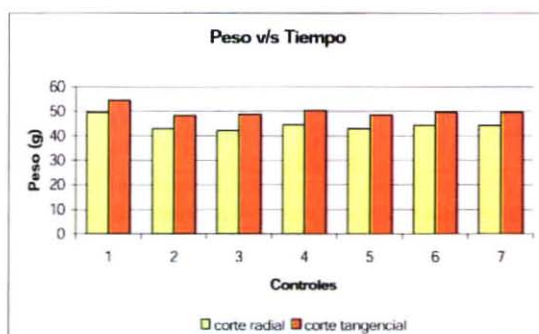


Figura 6-C: Probetas testigo

Control de la acanaladura

La tabla 6 resume los resultados obtenidos para esta determinación, observándose que el libre intercambio de humedad entre el medio ambiente y la madera generó tensiones en ésta, que se reflejan en formación de alabeos que son defectos típicos del secado, presentándose acanaladuras en ambos tipos de corte. A pesar de lo anterior, la magnitud y proporción del defecto es superior en aquellas piezas de corte tangencial.

Tabla 6: Frecuencia del alabeo acanaladura

Tipo de corte	Producto 3		Producto 4	
	Promedio (mm)	Frecuencia (%)	Promedio (mm)	Frecuencia (%)
Radial	0,5	63	1,5	63
Tangencial	2,8	88	2,5	100

El mayor daño lo sufrieron las probetas tratadas con el producto 4, en especial en el corte tangencial de la madera.

Variación del color

Las tablas 7-A y 7-B resumen los resultados obtenidos en esta determinación. Al igual que en los productos que forman película, la degradación por acción de la luz UV no es evitada, quedando de manifiesto lo anterior por el cambio de color que sufre la superficie de la madera producto de la oxidación.

Tabla 7-A: Variación de color en probetas con el producto 3

Tipo de corte	Producto 3	
	Color inicial	Color final
Radial	Rojo=202 Verde=139 Azul=106	Rojo=149 Verde=81 Azul=50
Tangencial	Rojo=204 Verde=141 Azul=107	Rojo=130 Verde=64 Azul=39

Tabla 7-B: Variación de color en probetas con el producto 4

Tipo de corte	Producto 4	
	Color inicial	Color final
Radial	Rojo=200 Verde=135 Azul=105	Rojo=135 Verde=63 Azul=35
Tangencial	Rojo=198 Verde=127 Azul=93	Rojo=114 Verde=50 Azul=24

Adicionalmente, se observa que el cambio de color que sufren las muestras después de la exposición es bastante similar en ambos productos. De la misma manera, en ambos productos se observa que la acción de la luz UV degrada de forma similar piezas tangenciales y radiales.

8.3 CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de la compatibilidad entre la madera y los revestimientos, ésta puede ser calificada como buena. Los productos que forman película no produjeron desprendimiento o descascaramiento de manera espontánea, y en el caso de los productos que no forman película no se produjeron exudaciones.

El brillo que pueda aportar un recubrimiento a una superficie depende de lo compacta que es la película aplicada y también del tipo de resina o aditivos que posee el recubrimiento. Del análisis de esta variable, el revestimiento que tuvo un mejor comportamiento fue el

producto 2, que a pesar de perder inicialmente una fracción de su brillo mantiene un valor estable en el tiempo, superior a los otros productos.

La adherencia es una propiedad de los revestimientos que forman una película continua y uniforme, y su evaluación es un buen índice para determinar la calidad de la película. Con respecto a los productos evaluados, no se observan diferencias significativas entre ellos (productos 1 y 2). Si es evidente el daño provocado por la luz UV en la cara expuesta al comparar su adherencia con la trasera no expuesta.

Durante los controles no se observaron variaciones de peso en las probetas, que representan la ganancia o pérdida de humedad durante las etapas de luz UV (60°C y 0% HR) y condensación de humedad (40°C y 100% HR), debido a que los controles fueron realizados en etapas de relajamiento de las probetas, una vez finalizada la etapa de luz UV.

El intercambio de humedad entre el medio ambiente y las probetas provocó esfuerzos en la madera que propiciaron la formación de acanaladura, presentándose con mayor fuerza en los productos que no forman película, en especial en aquellas probetas recubiertas con el producto 4.

El cambio de tonalidad de la madera, provocado por la luz UV, es un efecto que los recubrimientos incoloros no pueden evitar, ya que al no poseer pigmentos los rayos UV atacan directamente la madera, generando intercambios de energía que en el corto a mediano plazo provocan desfibramiento y desprendimiento de la película de revestimiento, según corresponda el tipo producto aplicado.

Las probetas pintadas con los productos 3 y 4, tras la exposición, sufrieron la pérdida de la suavidad natural aportada por el proceso de cepillado, mostrando aspereza producto del desfibramiento.

Finalmente, el mejor comportamiento lo obtuvieron los productos que forman película. La menor proporción de acanaladura y la menor pérdida de calidad superficial de las probetas sustentan esta afirmación.

8.4 BIBLIOGRAFÍA

- Martens, Ch. 1968. Technology of Paints, Varnishes and Lacquers. Edit. R. Krieger. USA.
- Lambourne, R. 1999. Paint and surface coatings :Theory and practice. Edit. E. horwood. Chichester. USA
- Weismantel, G. E. 1981. Paint Handbook. Edit.Mc Graw- Hill.Book C. USA.

CAPITULO IX: FABRICACIÓN DE TABLEROS OSB

En Chile actualmente existen aproximadamente 13.500 hectáreas de plantaciones de pino oregón, de las cuales un 41% tiene una edad menor a 20 años, por lo que presentan condiciones para ser sometidas a uno o dos raleos en el período. Lamentablemente, la madera que resulta de estas intervenciones no tiene una aplicación industrial, ya que los trozos de bajos diámetros no tienen utilización en la industria de celulosa, donde se trabaja con otras especies como pino radiata y eucalipto, ni tampoco presenta aptitud para ser impregnada, lo que impide su utilización en polines y cercos.

En la búsqueda de potenciales usos de este recurso, un estudio relacionado con la factibilidad técnica de producir tableros de partículas con madera de pino oregón concluyó que era posible su elaboración, obteniéndose buenas propiedades físicas y mecánicas (Peredo y Wolff, 1989). Continuando con esta línea de investigación, el objetivo planteado en este estudio pretende determinar la factibilidad técnica de fabricar tableros OSB para uso estructural con madera de esta especie.

9.1 METODOLOGÍA

9.1.1 Preparación del material

El material experimental utilizado en esta investigación fue proporcionado por Empresas Fourcade y proviene de un raleo a desecho realizado a una plantación de 32 años de edad, ubicada en el predio "Rucalhue" (sector Trafún, localidad de Futrono, X región) que tiene una densidad de 400 árboles/hectárea y un DAP promedio de 34 cm.

9.1.2 Fabricación de Tableros

La experiencia industrial se desarrolló en la planta de Tableros OSB Lousiana Pacific Chile S.A. El material obtenido del raleo alcanzó un total de 58 metros ruma (diámetros promedio entre 10 y 15 cm); los que inicialmente fueron descortezados y viruteados para la obtención de las hojuelas. Esta última etapa se realizó en un equipo que posee un disco de corte con aspas provistas de cuchillos y contracuchillos orientados en forma radial, los que se prepararon especialmente para esta prueba, manteniéndose el ángulo de corte del cuchillo en 32°, y disminuyendo el ángulo del contracuchillo a 40°, de manera de facilitar la salida de la hojuela al momento del corte, evitando la generación de finos en esta etapa.

Posteriormente, las hojuelas fueron secadas y acondicionadas hasta un contenido de humedad entre 2 y 4% y luego separadas en dos líneas de producción: material para las caras y alma del tablero.

¹ Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Instituto Forestal– Unidad de Industrias

² Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Instituto Forestal– Unidad de Industrias

El diseño experimental incluyó la fabricación de dos tipos de tableros un tipo corresponde a aquellos fabricados sólo con pino oregón (denominados 100% pino oregón) y el otro corresponde a aquellos fabricados con caras de pino oregón y alma de coigüe y roble (denominados combi).

Para el encolado de las hojuelas, se utilizó fenol formaldehído con porcentajes 3,5 y 4% para el alma y caras, respectivamente; además de un 1% de cera (por cada capa), a objeto de retardar la absorción de agua del tablero una vez puesto en servicio.

La capa inferior fue formada en dirección paralela al manto (largo del tablero); luego se formó la capa central (cuya orientación es perpendicular a la anterior) y finalmente se completó la formación del tablero con la capa superior paralela a la primera capa. Las proporciones utilizadas en cada una de las capas corresponde a 32, 38 y 30% para la superior, central e inferior, respectivamente. La siguiente figura muestra el colchón formado justo antes de ser prensado.



Figura 1: Colchón de OSB en formación

Las condiciones de operación utilizadas en la fabricación de tableros son las siguientes: colchón de formación en 3 capas, temperatura de 220 °C, presión específica de 35 kg/cm², tiempo de aplicación del calor de 142 segundos y de desgasificación de 24 segundos, idénticas para todos los casos. La densidad objetivo establecida corresponde a 670 ± 10 kg/m³ y el espesor final a 11,1 mm.

Finalmente, los tableros fueron acondicionados y dimensionados a formato comercial de 1,22 x 2,44 m.; luego de lo cual fueron almacenados en pallets de 72 tableros y sellados en sus cantos.



Figura 2: Tablero en proceso de formateado

9.1.3 Determinación de propiedades físicas y mecánicas

La determinación de propiedades físicas y mecánicas en los tableros se realizó sobre una muestra de 6 tableros (tres por cada tipo) obtenidos directamente desde la línea productiva. Las propiedades se evaluaron utilizando los procedimientos indicados en la norma APA- The Engineered Wood Association (ver tabla 1). Cabe mencionar que dependiendo del ensayo se obtuvieron probetas en el sentido paralelo y perpendicular al largo del tablero.

Tabla 1: Ensayos de propiedades físicas y mecánicas de tableros OSB

Propiedad	Ensayo	Probetas	Norma
Estabilidad dimensional			
• Expansión lineal	Secado/ vacío/presión	2	APA PRP-108 (test P-1)
• Hinchamiento	2 y 24 hrs en agua	1	ASTM D1037-99 (100-107)
Resistencia mecánica en seco¹			
• Resistencia a la flexión (MOR)	Flexión estática	4	ASTM D1037-99 (11-20)
• Rigidez (MOE)	Flexión estática	4	ASTM D1037-99 (11-20)
• Resistencia adhesión interna (IB)	Tracción perpendicular	5	ASTM D1037-99 (28-33)
Resistencia mecánica en húmedo²			
• Resistencia a la flexión (MOR)	Flexión estática	2	ASTM D1037-99 (11-20)

Fuente: LP Chile S.A. – INFOR

A partir de las determinaciones indicadas se calcularon otros dos parámetros de evaluación; el índice de elasticidad (EI), referido al grado de rigidez de la probeta en el ensayo de flexión, y el momento máximo (MM), relacionado con la carga máxima que soporta la pieza en el mismo ensayo. Ambos valores, fueron calculados utilizando las siguientes fórmulas:

$$EI = \frac{G \cdot L^3}{4 y \cdot b}$$

Donde

EI: Índice de elasticidad (lb– pulg² / pie), G: Diferencia de carga aplicada sobre la porción lineal de la curva (lb), L: Luz del ensayo (pulg), y: Flecha sobre la porción lineal de la curva (pulg), b: Ancho probeta (pulg).

$$MM = \frac{3 \cdot P \cdot L}{b}$$

Donde

MM: Momento máximo (lb-pulg/pie), P: Carga máxima (lb), L: Luz del ensayo (pulg), b: Ancho probeta (pulg).

¹ Seco: Probetas en condiciones normales de producción (3% contenido de humedad)

² Húmedo: Probetas sometidas a tratamiento de vacío (91 kPa, 30 min) e inmersión en agua (18°C, presión ambiente, 30 min)

9.2 RESULTADOS

9.2.1 Rendimiento del material

El índice de rendimiento de la materia prima en la confección de tableros 100% pino oregón alcanzó un valor de 1,25 metros ruma/m³ de tablero. Dicho valor es bueno, si se considera que en los procesos estándares de la empresa, empleando las especies nativas (coigüe y roble), el indicador es de 1,23 metros ruma/m³ de tablero.

9.2.2 Fabricación de tableros

Con el material experimental se fabricaron 1.632 tableros de los cuales 1.024 corresponden a tableros 100% de pino oregón y el resto a aquellos fabricados con pino oregón en las caras y alma de madera nativa.

Ambos tipos de tableros, presentan una buena apariencia visual, en términos de color y terminación superficial. A pesar de lo anterior, es importante mencionar que los tableros fabricados solamente con pino oregón presentaron una tonalidad más clara que los tableros tipo combi; situación que se explica por la coloración natural de las materias primas utilizadas en ambos tipos de tableros.

9.2.3 Propiedades físicas y mecánicas de los tableros OSB

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para las determinaciones físicas de los tableros evaluados; donde es posible observar que los valores de expansión lineal paralela, en ambos tipos de tableros, se encuentran muy por debajo del requerimiento máximo indicado en la norma APA (0,50%). Por el contrario, la expansión lineal perpendicular, de ambos tipos de tableros arroja valores muy cercanos al valor límite, encontrándose que el tablero tipo combi sobrepasa levemente el valor de aceptación.

Entre ambos tipos de tableros, se observan diferencias que se explican fundamentalmente por la menor razón de compactación que presentan los tableros tipo combi. Esto significa, que al incorporar una especie más densa en el centro del tablero, las hojuelas centrales tienden a compactarse menos y por ende absorberán una mayor cantidad de agua; lo que se traducirá en una mayor expansión e hinchamiento, que en el caso del tablero fabricado solamente con pino oregón.

Tabla 2: Propiedades físicas en tableros OSB

Tablero	Expansión lineal (%)		Hinchamiento (%)	
	Paralela	Perpendicular	2 horas	24 horas
100% pino oregón	0,23	0,48	4,2	23,5
Combi	0,26	0,53	5,1	20,3
Norma APA ⁵	0,50	0,50	S/requerimiento	S/requerimiento

Las tablas 3 y 4 presentan los resultados promedio de las evaluaciones mecánicas en los tableros. De acuerdo a lo observado, es posible concluir que ambos tipos de tableros cumplen en todos los casos los requerimientos de la norma APA.

⁵ Valor de referencia para tableros OSB 11,1 mm de espesor

Adicionalmente, se observa para todas las determinaciones realizadas que la resistencia mecánica de los tableros tipo combi es menor que la de los tableros fabricados solamente con pino oregón. A pesar de lo anterior, dichas diferencias son en todos los casos leves.

Cabe señalar que la norma APA no exige valores mínimos para el ensayo de resistencia a la adhesión (IB); por lo tanto los valores mostrados en la tabla 4 corresponden a la norma canadiense CAN 3-0437.0 M85. De acuerdo a esto, solamente los valores de resistencia a la adhesión obtenidos para el tablero combi satisfacen la condición de la norma canadiense.

Tabla 3: Propiedades mecánicas de tableros OSB de Pino oregón

Tablero	Flexión estática seco							
	MOR (PSI)		MOE (PSI)		MM (lb-pulg/pie)		EI (lb-pulg ² /pie)	
	Paralela	Perpend.	Paralela	Perpend.	Paralela	Perpend.	Paralela	Perpend.
Pino	5.667	2.765	818.544	337.494	2.112	1.015	66.004	26.624
Combi	5.268	2.477	752.023	299.203	1.920	924	58.361	24.255
Norma APA ⁶	3.736	1.985	656.793	238.834	1.430	760	55.000	20.000

Tabla 4: Propiedades mecánicas de tableros OSB de pino oregón

Tablero	Flexión estática húmedo		IB (PSI)
	MOR (PSI)	MM (lb-pulg/pie)	
Pino	2.724	1.014	47,1
Combi	2.672	975	55,3
Norma APA	1.881	720	50,0 ⁷

9.3 CONCLUSIONES

Los tableros fabricados solamente con pino oregón cumplen las exigencias establecidas en ensayos físicos y mecánicos por la norma APA– The Engineered Wood Association.

Los tableros tipo combi cumplen con todas las exigencias de la APA– The Engineered Wood Association, excepto en el ensayo físico de expansión lineal perpendicular, donde el resultado obtenido es levemente superior al exigido por la norma.

El rendimiento del proceso de fabricación de tableros OSB con madera de pino oregón (100%) fue de 1,25 metros ruma/m³ tablero, valor levemente superior al alcanzado en operación normal de la planta.

Los tableros OSB de pino oregón presentan una superficie más lisa y un color más claro que los tableros OSB tradicionales confeccionados con maderas nativas chilenas. Respecto de la terminación superficial, ambos tipos de tableros presentan características superficiales que los hacen adecuados para ser utilizados como tableros recubiertos.

⁶ Valor de referencia tablero OSB 11,1 mm de espesor.

⁷ Valor de referencia tablero OSB 11,1 mm de espesor utilizado por la norma canadiense CAN 3-0437.0 M85

9.4 BIBLIOGRAFÍA

APA – The Engineered Wood Association.1992."Performance standard for wood-based structural - use panels". PS2 - 92.

APA – The Engineered Wood Association.1994 "Performance standards and policies for structural - use panels". PRP - 108.

Fundación Chile - Centro de Información de Mercado. 1998. "Oriented Strand Board: Un éxito Made in U.S.A.". Lignum N° 37. pp. 31-33.

Price, Frederick. 2001. "Tecnología más económica y eficiente: Louisiana Pacific apuesta a revolucionar el rubro de la construcción en madera". Lignum N° 54. pp. 28-30.

NUEVOS PRODUCTOS Y MERCADOS QUE PERMITAN LA INCORPORACION DEL PINO OREGON
AL SISTEMA PRODUCTIVO NACIONAL (FDI-CORFO/INFOR)



GOBIERNO DE CHILE
CORFO



INFOR
Instituto Forestal

Instituto Forestal • Camino a Coronel km 7,5 • Concepción • Chile
<http://www.infor.cl>