

CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DEL PINO PONDEROSA DE AYSÉN



CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DEL PINO PONDEROSA DE AYSÉN

Gonzalo Hernández C.¹, Víctor Barrera B.², Iván Moya N.³, Patricio Elgueta M.⁴
Rubén Ananías A.⁵, William Gacitúa E.⁶, Víctor Sagner K.⁷, Lon Sibert.⁸
Bernardo Acuña A.⁹, Exequiel Díaz V.¹⁰

INSTITUTO FORESTAL
Tecnología e Industrias de la Madera
2013

- ¹ Instituto Forestal, Sede Bío-Bío. gonzalo.hernandez@infor.cl
- ² Instituto Forestal, Sede Patagonia. victor.barrera@infor.cl
- ³ Instituto Forestal, Sede Patagonia. ivan.moya@infor.cl
- ⁴ Instituto Forestal, Sede Bío-Bío. patricio.elgueta@infor.cl
- ⁵ Universidad del Bío-Bío, Sede Concepción. ananias@ubiobio.cl
- ⁶ Universidad del Bío-Bío, Sede Concepción. wgacitua@ubiobio.cl
- ⁷ Maderas Curvadas. maderascurvadas@hotmail.com
- ⁸ Renewable Resource Associates. lon@rrainc.net
- ⁹ Instituto Forestal, Sede Patagonia. bernardo.acuna@infor.cl
- ¹⁰ Instituto Forestal, Sede Patagonia. exequiel.diaz@infor.cl



INSTITUTO FORESTAL - Chile 2013
CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DEL PINO PONDEROSA DE AYSÉN
Informe Técnico N° 192
Unidad de Tecnología e Industria de la Madera, INFOR, Sede Bío-Bío.
Proyecto del Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC) 2011.
ISBN N° 978-956-318-081-7

www.infor.cl

PRÓLOGO

El pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl.), originario del N.O. de Estados Unidos, es la especie más plantada en la Región de Aysén, donde existen ya unas 25 mil hectáreas con esta especie, superficie que se prevé seguirá incrementándose, dadas las extensas áreas de suelos desarbolados que presenta la región.

La publicación “Caracterización Tecnológica del Pino ponderosa de Aysén” fue financiada con recursos del Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC) de la Región de Aysén, año 2011.

Este Informe Técnico es una recopilación de 6 estudios tecnológicos ejecutados con madera de pino ponderosa de la Región de Aysén. El primero cuantifica los rendimientos de las calidades visuales de la madera aserrada para aplicaciones estructurales, muebles, apariencia y remanufactura; el segundo identifica programas de secado artificial para madera de 25 y 50 mm de espesor; el tercero define la durabilidad natural de la madera; el cuarto entrega un programa de preservación vacío y presión; el quinto registra las propiedades físicas y mecánicas, y el sexto y último describe la aptitud de la madera vaporizada para el curvado mecánico.

Esta publicación tiene por objetivo proporcionar herramientas tecnológicas para desarrollar productos con valor agregado con la madera de pino ponderosa, y de manera indirecta incentivar el manejo de pino ponderosa en la región, con el objetivo de generar un polo de desarrollo industrial y comercial con el recurso.

Participaron en el proyecto los profesionales de INFOR, ingenieros Srs. Iván Moya, Victor Barrera, Patricio Elgueta y Gonzalo Hernández; los profesionales de la Universidad del Bío-Bío, Srs. Rubén Ananías y William Gacitúa, el profesional Sr. Victor Sagner y el Presidente de RRA (Renewable Resource Associates), Inc., Sr. Lon Sibert.

Se agradece al Gobierno Regional de Aysén y su Consejo por la confianza y los aportes para la ejecución de esta investigación, la cual contribuye a la actividad económica regional con elevados niveles de eficiencia, encadenamientos y competitividad, generando información base para el desarrollo forestal de la región. Además, se agradece a la Corporación Nacional Forestal (CONAF) por el aporte de la materia prima para el desarrollo de este estudio.

INDICE GENERAL

CAPITULO I	ASERRÍO Y CLASIFICACIÓN	1
	1.1 Objetivo General	1
	1.2 Material y Método	1
	1.3 Resultados	3
	1.3.1 Distribución Diamétrica y Volumen de Trozos Procesados	3
	1.3.2 Aserrío e Indicadores Asociados	3
	1.3.3 Clasificación Visual	7
	1.4 Conclusiones	12
	1.5 Referencias	13
CAPÍTULO II	SECADO	15
	2.1 Objetivo General	15
	2.2 Objetivos Específicos	15
	2.3 Material y Método	15
	2.3.1 Procedencia de la Madera	15
	2.3.2 Ensayos a Escala Piloto	15
	2.3.3 Ensayos a Escala Industrial	17
	2.4 Resultados	17
	2.4.1 Secado a Escala de Laboratorio	17
	2.4.2 Secado a Escala Industrial	20
	2.4.3 Contracción al Final del Secado	22
	2.4.4 Evaluación de la Calidad del Secado	22
	2.5 Conclusiones	25
	2.6 Referencias	25
CAPÍTULO III	PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS	27
	3.1 Objetivos Generales	27
	3.2 Material y Método	27
	3.2.1 Densidad	29
	3.2.2 Dureza	29
	3.2.3 Flexión Estática	30

	3.2.4 Compresión Paralela a la Fibra	31
	3.2.5 Clivaje Unitario	31
	3.3 Resultados	32
	3.4 Conclusiones	41
	3.5 Referencias	41
CAPÍTULO IV	DURABILIDAD NATURAL	43
	4.1 Objetivo General	43
	4.2 Objetivos Específicos	43
	4.3 Material y Método	43
	4.4 Resultados	46
	4.5 Conclusiones	51
	4.6 Referencias	51
CAPÍTULO V	IMPREGNACIÓN	54
	5.1 Objetivo General	54
	5.2 Objetivos Específicos	54
	5.3 Material y Método	54
	5.4 Resultados	56
	5.5 Conclusiones	57
	5.6 Referencias	57
CAPÍTULO VI	CURVADO DE MADERA SÓLIDA VAPORIZADA	59
	6.1 Objetivo General	59
	6.2 Objetivos Específicos	59
	6.3 Material y Método	59
	6.4 Resultados	61
	6.5 Conclusiones	67
	6.6 Referencias	67

CAPÍTULO I. ASERRÍO Y CLASIFICACIÓN

Lon Sibert. RRA

La clasificación visual es una técnica que consiste en inspeccionar las cuatro caras de una pieza de madera con el objetivo de asignarle una calidad estructural o de apariencia, en función de la naturaleza, tamaño y ubicación de las características naturales de la madera y los defectos asociados al proceso de aserrío.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar los rendimientos de la clasificación visual de la madera aserrada de pino ponderosa de la Región de Aysén, para aplicaciones estructurales y de apariencia, considerando especificaciones industriales y normas nacionales e internacionales.

1.2. MATERIAL Y MÉTODO

Se utilizaron 33 trozas de 35 años de edad, con un DAP promedio de 40,5 cm, provenientes de la Reserva Nacional Coyhaique, Región de Aysén, Chile.

Las Tablas N° 1 y N° 2 registran antecedentes prediales, dasométricos y de manejo del rodal. De la tabla N° 2 se desprende que el 90% de los árboles utilizados no presentó problemas de pudrición, mientras que su forma se distribuyó en forma equitativa entre las calidades buena y regular.

Tabla N° 1. Antecedentes Prediales

Predio	Reserva Nacional	Fecha volteo	22/07/2011	
Propietario	CONAF	Coordenadas	X	266773
Sector	Rotonda		Y	4953068
Rodal	R-8	Brigada INFOR	V. Barrera B. Acuña	
Superficie (ha)	8,5			
Edad (años)	35			

Tabla N° 2. Antecedentes Dasométricos y de Manejo

DAP medio (cm)	40,50	Manejo								
Altura media (m)	16,50	Raleo	Si		No	X	Calidad	1	2	3
Conicidad (mm)		Poda	Si	X	No		Sanidad	90	10	
Distancia ramas (cm)	49,70	Altura poda (cm)	-				Forma	50	50	

1: Bueno; 2: Regular; 3: Malo

Las actividades de volteo de los árboles, madereo, despacho a Coyhaique y arribo de las trozas al lugar de procesamiento y estudio se realizaron entre el 6 y 23 de enero de 2012.

Las trozas fueron mantenidas bajo riego por aspersión para evitar el desarrollo de la mancha azul, coloración que ocasiona rechazo de la madera en el proceso de clasificación visual.

Se aplicaron 2 esquemas de corte, orientados a generar madera aserrada de 1 y 2 pulgadas de espesor y anchos variables (Figuras N° 1 y N° 2). El aserrío de las trozas se ejecutó en las instalaciones industriales de la empresa Ernesto Stuck e Hijos Ltda., ubicada en el Fundo San José Sur, Lote 2, comuna de Tomé, Región del Bío-Bío, Chile.

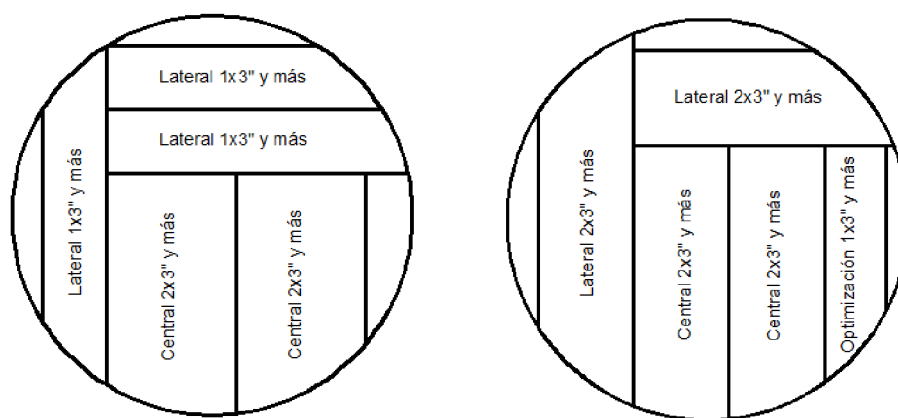


Figura N° 1. Esquema de Corte N° 1 Figura N° 2. Esquema de Corte N° 2

Un total de 18 trozas fueron aserradas con el esquema de corte N° 1, considerando diámetros entre 18 a 24 cm, y 15 trozas con el esquema de corte N° 2, con diámetros entre 24 a 30 cm. Aserradas las trozas, se determinó el volumen de la madera aserrada generada por cada esquema de corte. La madera aserrada fue secada, cepillada y clasificada visualmente, trabajando con largos útiles de 2,4 y 3,2 m. La clasificación visual de la madera la ejecutó la Agencia de Clasificación de Maderas de EE.UU.; RRA (Renewable Resource Associates Inc.).

En la Tabla N° 3 se registran las normas y especificaciones utilizadas en la clasificación de la madera, señalando en cada caso los distintos grados visuales que arrojó su aplicación.

Tabla N° 3. Resumen Normas de Clasificación

Espesor	Origen Especificación, Norma	Clasificación	Grados Visuales
1"	Especificación industrial. Chile	Muebles	Mueble 1; Mueble 2; Rechazo
	WWPA. Estados Unidos	Select, Commons	B&B; C Select; D Select
			2 Common; 3 Common; 4 Common
2"	NCh 1207	Estructural	GS; G1; G2; Rechazo
	NGR. Estados Unidos	Estructural	SS; #1; #2; #3; Rechazo
	Especificación industrial. Chile	Muebles	RIP1; RIP2; RIP3; RIP OUT
	WWPA. Estados Unidos	Factory	SHOP1; SHOP2; SHOP3; SHOP OUT

En la Tabla N° 4 se describen los requisitos visuales para la madera de uso en muebles. Los referidos a "revestimiento", "estructural" y "factory" se detallan en las normas específicas.

Tabla N° 4. Especificaciones para la Madera de Uso en Muebles

Especificación	Grado Visual	Exigencia
Industrial	Mueble 1	60% y más de la pieza con corte clear, largo mayor a 600 mm.
	Mueble 2	60% y más de la pieza con corte clear, largo mayor a 300 mm.
	RIP 1	2/3 y más del área para cortes molduras, ancho mayor a 1" por 10 pies de largo.
	RIP 2	50% y más del área para cortes cutstock, calidad 1, ancho pieza en su peor cara y de largo mínimo de 20".
	RIP 3	65% y más del área para cortes cutstock, calidad 1, ancho pieza en su peor cara y de largo mínimo de 20".
	RIP OUT	No califica en los grados anteriores.

Clear: Pieza de madera libre de defectos; Cutstock: Pieza libre de nudos de largo fijo

1.3. RESULTADOS

1.3.1. Distribución Diamétrica y Volumen de Trozas Procesadas

En la Tabla N° 5 se registra la frecuencia diamétrica de las trozas aserradas, diferenciado por esquema de corte aplicado y el volumen asociado a cada uno de ellos.

Tabla 5. Diámetros de las Trozas Procesadas

Antecedente	Diámetro (cm)						
	18	20	22	24	26	28	30
Cantidad trozas, esquema N°1	1	4	10	3	-	-	-
Cantidad trozas, esquema N°2	-	-	-	7	6	1	1
Volumen de trozas, esquema N°1 (m³)	2,72						
Volumen de trozas, esquema N°2 (m³)	3,13						
Total trozas procesadas	33						

1.3.2. Aserrió e Indicadores Asociados

En la Tabla N° 6 se detallan los parámetros de aserrío con los esquemas N° 1 y N° 2.

Tabla 6. Parámetros del Aserrió

Esquema de Aserrió	Indicadores
N°1	139 piezas aserradas, 97 de 1" (lateral) y 42 de 2" (central). Las escuadrías 1 x 3, 1 x 4 y 1 x 6 concentran el 89% de piezas de 1". Las escuadrías 2 x 3, 2 x 4 y 2 x 5 concentran el 91% de piezas de 2".
N°2	114 piezas aserradas, 34 de 1" (lateral) y 80 de 2" (madera lateral y central). Las escuadrías 1 x 3, 1 x 4 y 1 x 6 concentran el 87% de piezas de 1". Las escuadrías 2 x 3, 2 x 4 y 2 x 5 concentran el 62% de piezas de 2".

En las Figuras N° 3 y N° 4 se registran 2 etapas del aserrío del pino ponderosa.



Figura N° 3. Destape de la Troza



Figura N° 4. Obtención de Pieza Lateral

En las Tablas N° 7 y N° 8 se muestra la cantidad de piezas aserradas y los volúmenes asociados a los esquemas de corte N° 1 y N° 2. En las Figuras N° 5 y N° 6 se ilustra la distribución de volumen generado con los esquemas de corte N° 1 y N° 2, considerando madera lateral y central.

Tabla N° 7. Producción de Madera con el Esquema de Corte N° 1

Esquema N°1	Dimensiones			Madera Lateral		Madera Central	
Nominal	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Largo (m)	Total Piezas	(m³)	Total Piezas	(m³)
1 x 2	25,4	50,8	3,20	5	0,02	0	0,00
1 x 3	25,4	76,2	3,20	28	0,17	0	0,00
1 x 4	25,4	101,6	3,20	45	0,37	0	0,00
1 x 5	25,4	127	3,20	5	0,05	0	0,00
1 x 6	25,4	152,4	3,20	13	0,16	0	0,00
1 x 7	25,4	177,8	3,20	0	0,00	0	0,00
1 x 8	25,4	203,2	3,20	1	0,02	0	0,00
1 x 9	25,4	228,6	3,20	0	0,00	0	0,00
1 x 10	25,4	254	3,20	0	0,00	0	0,00
Subtotal madera 1"				97	0,79	0	0,00
2 x 2	50,8	50,8	3,20	0	0,00	1	0,01
2 x 3	50,8	76,2	3,20	0	0,00	7	0,09
2 x 4	50,8	101,6	3,20	0	0,00	23	0,38
2 x 5	50,8	127	3,20	0	0,00	3	0,06
2 x 6	50,8	152,4	3,20	0	0,00	8	0,20
2 x 7	50,8	177,8	3,20	0	0,00	0	0,00
2 x 8	50,8	203,2	3,20	0	0,00	0	0,00
2 x 9	50,8	228,6	3,20	0	0,00	0	0,00
2 x 10	50,8	254	3,20	0	0,00	0	0,00
Subtotal madera 2"				0	0,00	42	0,74
Totales				97	0,79	42	0,74
Total de piezas aserradas				139			
Total m³ aserrados				1,53			

Nota: Las piezas de 1 x 2 y 2 x 2 no fueron clasificadas visualmente.

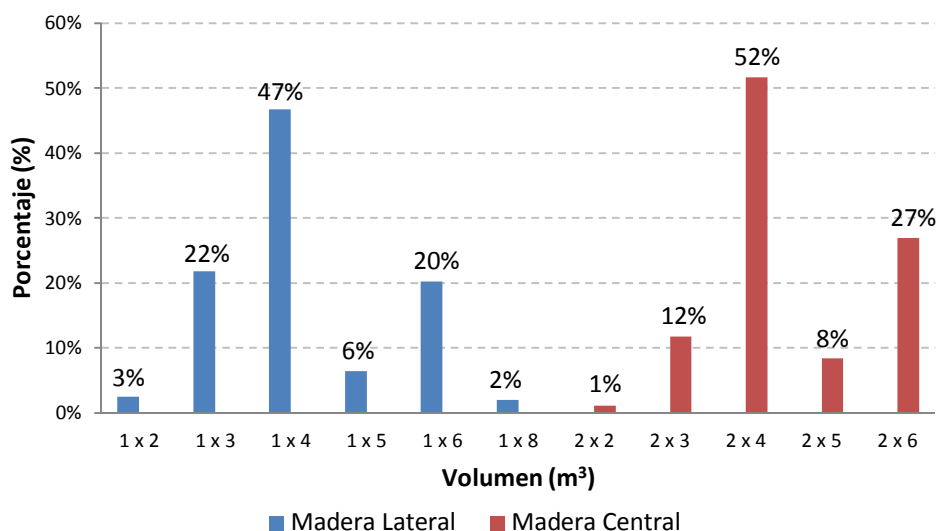


Figura N° 5. Distribución de Escuadrías de Acuerdo al Esquema de Corte N° 1

Tabla N° 8. Producción de Madera con el Esquema de Corte N° 2

Esquema N°2	Dimensiones			Madera Lateral		Madera Central	
Nominal	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Largo (m)	Total Piezas	(m³)	Total Piezas	(m³)
1 x 2	25,4	50,8	3,20	7	0,03	0	0,00
1 x 3	25,4	76,2	3,20	14	0,09	0	0,00
1 x 4	25,4	101,6	3,20	11	0,09	0	0,00
1 x 5	25,4	127	3,20	0	0,00	0	0,00
1 x 6	25,4	152,4	3,20	2	0,02	0	0,00
1 x 7	25,4	177,8	3,20	0	0,00	0	0,00
1 x 8	25,4	203,2	3,20	0	0,00	0	0,00
1 x 9	25,4	228,6	3,20	0	0,00	0	0,00
1 x 10	25,4	254	3,20	0	0,00	0	0,00
Subtotal madera 1"				34	0,23	0	0,00
2 x 2	50,8	50,8	3,20	0	0,00	0	0,00
2 x 3	50,8	76,2	3,20	4	0,05	0	0,00
2 x 4	50,8	101,6	3,20	15	0,25	9	0,15
2 x 5	50,8	127	3,20	20	0,41	8	0,17
2 x 6	50,8	152,4	3,20	13	0,32	7	0,17
2 x 7	50,8	177,8	3,20	0	0,00	0	0,00
2 x 8	50,8	203,2	3,20	2	0,07	1	0,03
2 x 9	50,8	228,6	3,20	0	0,00	0	0,00
2 x 10	50,8	254	3,20	1	0,04	0	0,00
Subtotal madera 2"				55	1,14	25	0,52
Totales				89	1,37	25	0,52
Total de piezas aserradas				114			
Total m³ aserrados				1,89			

Nota: las piezas de 2 x 2 no fueron clasificadas visualmente.

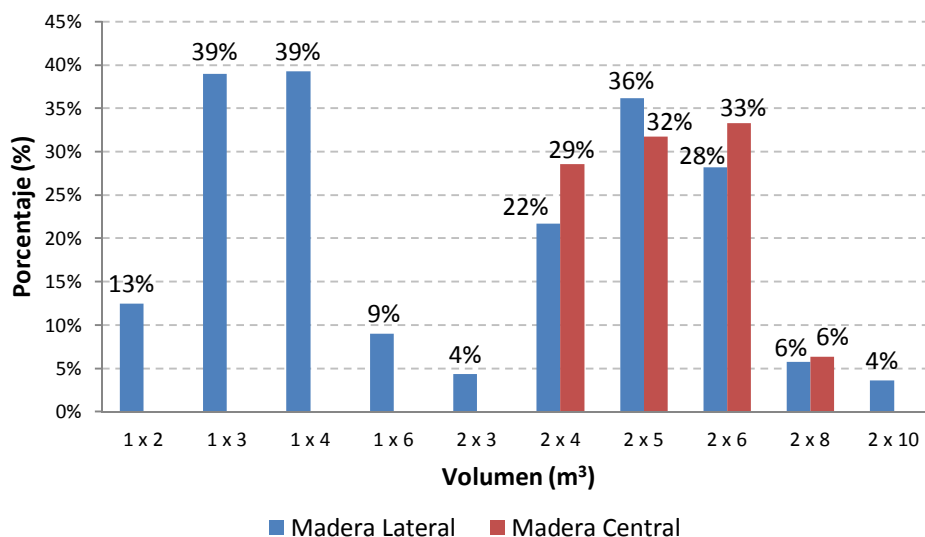


Figura N° 6. Distribución de Escuadrías de Acuerdo al Esquema de Corte N° 2

1.3.3. Clasificación Visual

En las Tablas N° 9 a N° 11 se indican los rendimientos de la clasificación visual de la madera aserrada de pino ponderosa, según el esquema de corte aplicado.

La Tabla N° 9 corresponde a madera de 1" espesor, uso en "muebles" (secciones libres de defectos) y "select y common" (pueden usarse en largo completo o largos reducidos, para fabricar revestimientos o armarios).

En la Tabla N° 10 se indican los rendimientos de madera de 1" espesor, uso en "muebles" y "factory" (busca secciones libres de defectos, fabricar puertas y ventanas); En la Tabla N° 11 se señalan los rendimientos de madera de 2" espesor, para uso "estructural".

En las Figuras N° 7 a N° 12 se ilustra la distribución porcentual de las calidades visuales que se generaron al aplicar las especificaciones y normas consideradas por el estudio.

En la Figura N° 7 se señala que el rendimiento de la calidad visual M1 fue inferior a la M2, con 32% y 46% respectivamente. En la Figura N° 8 se aprecia que la calidad visual "2 common" obtuvo el mejor rendimiento, seguido de "3 common" y "4 common". En la Figura N° 9 se destaca la calidad visual "Rip 3" como la de mayor frecuencia, con 51% del total de piezas inspeccionadas. En la Figura N° 10 se evidencia el predominio del grado "P99", con un 60% del total, seguido por el grado "Shop" con un 33%.

Tabla N° 9. Clasificación de Madera de 1": Muebles; Select y Common

Esquema de corte	Escuadría comercial y anchos actuales	Piezas clasificadas por largos finales (m)		Clasificada según criterio industrial			Clasificada según WWPA, edición vigente					
		N° de Piezas / % de Piezas Inspeccionadas		Rechazo	C&Btr Select	D Select	2 Common	3 Common	4 Common	Rechazo		
		3,22	2,44								M1	M2
1	1 x 3 69mm	14	10	7 29,20%	14 58,30%	3 12,50%	1 4,20%	1 4,20%	1 8 33,30%	5 20,80%	4 16,70%	5 20,80%
1	1 x 4 95mm	14	7	15 32,60%	18 39,10%	13 28,30%	1 2,17%	1 2,17%	1 21 45,65%	16 34,80%	6 13,04%	1 2,17%
1	1 x 5 118mm	4	2	1 16,60%	4 66,70%	1 16,70%	1 16,70%	-	3 50,00%	1 16,70%	1 16,70%	-
1	1 x 6 142mm	9	4	5 38,50%	4 30,80%	4 30,70%	-	-	6 46,15%	6 46,15%	1 7,70%	-
2	1 x 3 69mm	9	5	5 35,70%	6 42,90%	3 21,40%	1 7,10%	1 7,10%	2 14,30%	7 50,00%	2 14,30%	1 7,10%
2	1 x 4 95mm	6	9	5 33,30%	9 60,00%	1 6,70%	1 6,70%	1 6,70%	4 26,70%	5 33,30%	3 20,00%	1 0,067
2	1 x 6 142mm	1	1	-	1 50,00%	1 50,00%	-	-	1 50,00%	1 50,00%	-	-

Tabla N° 10. Clasificación de Madera de 2": Muebles y Factory

Esquema de corte	Escuadría comercial y anchos actuales	Piezas clasificadas por largos finales (m)		Clasificada según criterio industrial N° de Piezas / % de Piezas Inspeccionadas				Clasificada según WWPA, edición vigente N° de Piezas / % de Piezas Inspeccionadas		
		3,22	2,44	RIP 1	RIP 2	RIP 3	Rechazo	SHOP 3	P 99	Rechazo
1	2 x 3 69 mm	6	2	-	-	7 87,50%	1 12,50%	-	-	-
1	2 x 4 95 mm	16	5	-	7 33,30%	5 23,80%	9 42,90%	-	-	-
1	2 x 5 118 mm	4	1	-	-	3 60,00%	2 40,00%	-	-	-
1	2 x 6 142 mm	6	-	-	-	-	-	-	5 83,30%	1 16,70%
2	2 x 3 69 mm	2	1	-	-	3 100,00%	-	-	-	-
2	2 x 4 95 mm	19	6	-	2 8,00%	17 68,00%	6 24,00%	-	-	-
2	2 x 5 118 mm	24	4	1 3,06%	8 28,60%	11 39,30%	8 28,60%	-	-	-
2	2 x 6 142 mm	15	5	-	-	-	-	8 40,00%	11 55,00%	1 50,00%
2	2 x 8 205 mm	2	1	-	-	-	-	2 66,60%	1 33,30%	-
2	2 x 10 260 mm	1	-	-	-	-	-	-	1 100,00%	-

Tabla N° 11. Clasificación de Madera de 2": Estructural

Esquema de corte	Escuadría comercial y anchos actuales	Piezas clasificadas por largos finales (m)		Clasificada según NCh1207-Of.2005 N° de Piezas / % de Piezas Inspeccionadas				Clasificada según NGR, edición vigente N° de Piezas / % de Piezas Inspeccionadas				
		3,22	2,44	GS	G1	G2	Rechazo	SS	#1	#2	#3	Rechazo
1	2 x 3 69 mm	6	2	-	-	4	4	-	2	-	2	4
1	2 x 4 95 mm	16	5	-	3	15	3	-	5	7	7	2
1	2 x 5 118 mm	4	1	-	1	3	1	-	2	-	2	1
1	2 x 6 142 mm	6	-	-	1	4	1	-	1	4	-	1
2	2 x 3 69 mm	2	1	-	1	-	2	-	1	-	2	-
2	2 x 4 95 mm	19	6	-	8	11	6	-	6	12	5	2
2	2 x 5 118 mm	24	4	4	7	9	8	5	3	8	9	3
2	2 x 6 142 mm	15	5	3	5	10	2	3	6	6	3	2
2	2 x 8 205 mm	2	1	1	2	-	-	1	2	-	-	-
2	2 x 10 260 mm	1	-	-	-	-	R	-	-	-	-	R
							100,00%					100,00%

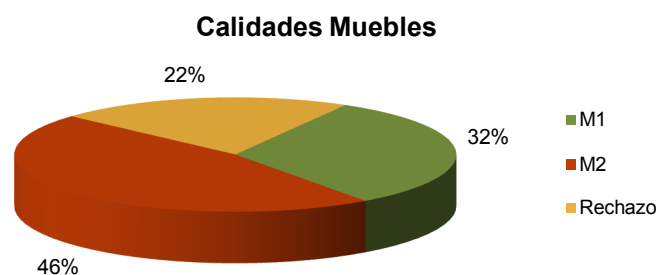


Figura N° 7. Distribución de Calidades, Criterio Industrial

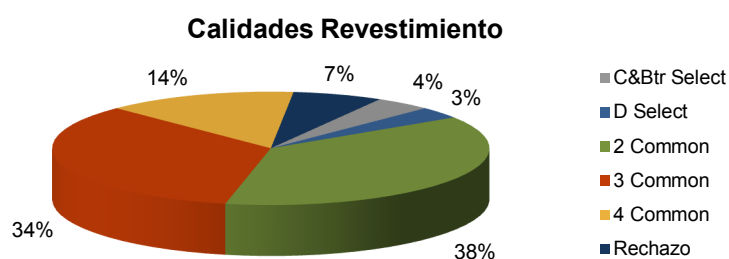


Figura N° 8. Distribución de Calidades, WWPA

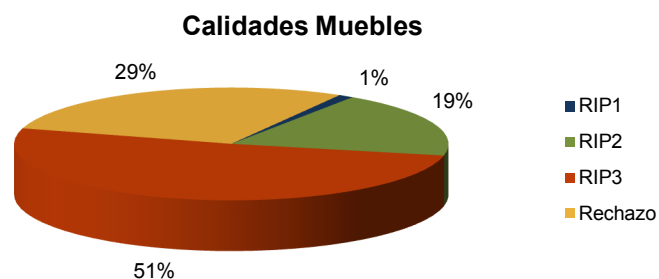


Figura N° 9. Distribución de Calidades, Criterio Industrial

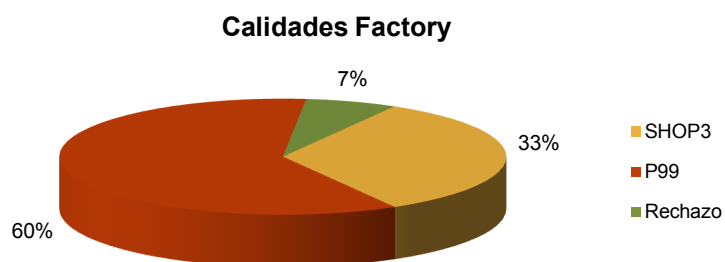


Figura N° 10. Distribución de Calidades, WWPA

En la Figura N° 11 se aprecia que el rendimiento de la calidad visual “G2” fue superior a las demás, con un 47% de las piezas clasificadas. La Figura N° 12 ilustra que un 31% del total corresponde a piezas de calidad “grado #2”, siendo el grado que más aporta al total clasificado, seguido por el “grado #3”.

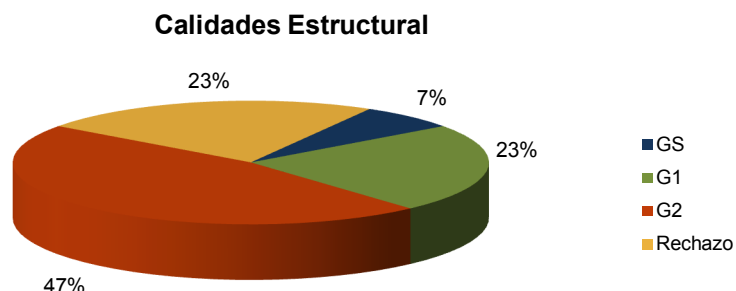


Figura N° 11. Distribución de Calidades, NCh1207

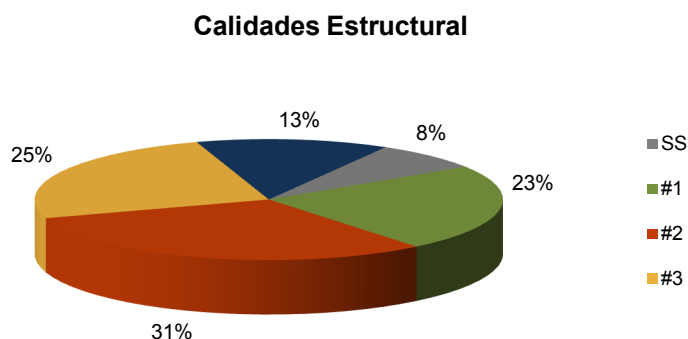


Figura N° 12. Distribución de Calidades, NGR

1.4. CONCLUSIONES

La madera aserrada de pino ponderosa de Aysén tiene buena apariencia. La albura es de color crema y la tonalidad entre piezas es uniforme.

La madera presenta fibra recta, una distancia promedio entre nudos de 400 a 500 mm, baja presencia de pecas, pocos bolsillos de resina y corteza, ausencia de grietas naturales y de secado. No se observa madera de compresión e hincaduras de cono.

Los anillos son uniformes y delgados en madera de verano. Una observación de terreno registró anillos de primavera y verano con anchos promedios de 1,0 y 5,0 mm respectivamente. Otra observación señala que hubo un promedio de 3,5 anillos completos en piezas con médula (considerando el anillo de verano y el anillo de primavera) y un promedio de 4,5 anillos completos en piezas sin médula.

Se observó variedad de nudos en la madera de apariencia:

- Nudos “vivos” y rojos, sin grietas, de alta apariencia, que conforman el grado “2 Common” para la madera 1” de espesor.
- Nudos “muertos” y nudos rodeados por corteza, que normalmente conforman al grado “3 Common” para la madera 1” de espesor.
- Nudos muertos en ambas caras, los cuales normalmente conforman el grado “4 Common” para la madera de 1” de espesor.

Las piezas con nudos de tamaño importante o nudos de calidad inferior (con grietas abiertas, con corteza, con nudos sueltos, agujeros) que son rechazadas para uso estructural o para un grado de apariencia mayor (2 Common y mejor), que no presentan médula ni pecas, constituyen una gran oportunidad para obtener cortes (“cuttings”) de madera clear, para uso en muebles y otros productos que utilizan secciones de madera libre de defectos.

La madera de pino ponderosa de la Región Aysén es un recurso renovable apto para muchos usos comerciales. Puede ser usada en productos de apariencia, en secciones largas y cortas, y para la construcción. Este último punto, previa determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

1.5. REFERENCIAS

NCh 1207, Of.2005. “Pino radiata. Clasificación Visual para Uso Estructural. Especificaciones de los grados de Calidad”. INN. Santiago, Chile.

NGR, 2004. National Grading Rule for Dimension Lumber (NGR). American Lumber Standard Committee. Estados Unidos.

WWPA, 2011. Western Lumber Grading Rules. Western Wood Products Association. Portland, Oregon, Estados Unidos.

CAPÍTULO II. SECADO

Rubén A. Ananías, UBB

En el contexto de otorgar mayor valor agregado a la madera de pino ponderosa, el proceso de secado en cámara es fundamental. Los mejores programas de secado a nivel industrial son aquellos que optimizan el costo del proceso y la calidad final de la madera.

La madera sometida a un determinado programa de secado es evaluada en base a una serie de parámetros, los que deben ser mantenidos bajo ciertos límites para reducir los problemas de procesamiento posterior o puesta en servicio.

2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar en forma experimental programas de secado convencional para madera aserrada de pino ponderosa.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Ejecutar ensayos a escala de laboratorio con madera aserrada de 25 y 50 mm de espesor.

Cuantificar los defectos del secado: Grietas, tensiones, cambios de color y alabeos.

Proponer programas de secado para cada espesor.

Validar programas de secado a escala industrial para cada espesor.

2.3. MATERIAL Y MÉTODO

2.3.1. Procedencia de la Madera

En los ensayos piloto se utilizó madera proveniente de la Reserva Nacional Coyhaique, Región de Aysén. Antecedentes prediales, dasométricos y de manejo del rodal desde donde se seleccionaron los árboles se presentan en las Tablas N° 1 y N° 2 (Capítulo I).

2.3.2. Ensayos a Escala piloto

Treinta y seis trozas de pino ponderosa con diámetros entre 20 y 29 cm y 2,4 m de largo fueron aserradas a espesores de 25 y 50 mm, privilegiando la madera lateral y cortes tangenciales. La madera aserrada fue almacenada bajo agua y dimensionada a 1 metro de largo para los ensayos de secado.

Se utilizó un horno de secado convencional a escala de laboratorio de 0,3 m³ de capacidad. En cada carga se secaron 104 y 72 piezas de 25 y 50 mm, respectivamente. La metodología consideró 6 ensayos de secado a escala piloto e incluyó como variables el espesor (25, 50 mm) y el tipo de programa (convencional, convencional acelerado). Se midió la contracción, heterogeneidad de la humedad final, gradiente de humedad, tensiones de secado, grietas, alabeos y cambios de color en 24 piezas.

La evaluación de la calidad de la madera se basó en adaptaciones recogidas de estandarizaciones europeas presentadas en las tablas N° 12 y N° 13 (Welling, 1994; Álvarez y Fernández, 1992). En particular, para evaluar los cambios de color la superficie de la madera fue cepillada, cada 0,5 mm, hasta eliminar completamente la coloración.

Tabla N° 12. Especificaciones de Calidad

Calidad	CHF (%)	GH (%)	TFS (mm)
Estándar	7-13	4	3
Secado	8-12	3	2
Exclusiva	9-11	2	1

CHF: Contenido humedad final. GH: Gradiente humedad
TFS: Tensiones final secado

Tabla N° 13. Intensidad de las Grietas y Cambios de Color

Intensidad	GI (%)	GS (mm)	GE (cm)	CC (mm)
Severa	>10	>5	>20	>3
Moderada	2-10	2-5	5-20	2-3
Leve	<2	<2	<5	<2

GI: Grietas internas GS : Grietas superficiales
GE: Grietas extremos CC: Cambios color

Los alabeos fueron cuantificados según magnitudes que se registran en la Tabla N° 14, adaptadas de NCh 993.

Tabla N° 14. Alabeos Admisibles, para 1 m de Largo

Alabeo	Espesor (mm)	Sin Alabeo (mm)	Leve (mm)	Moderado (mm)	Intenso (mm)
Acanaladura	25	0	1-3	3-5	>5
	50	0	1-3	3-5	>5
Arqueadura	25	0	1-3	3-6	>6
	50	0	1-2	2-4	>4
Encorvadura	25	0	1-2	2-3	>3
	50	0	1-2	2-3	>3
Torcedura	25	0	1-2	2-7	>7
	50	0	1-2	2-7	>7

La humedad de la madera durante el secado fue recogida mediante pesadas de 8 muestras testigos. Inicialmente se determinó su humedad a través de probetas que fueron secadas en estufa por 24 horas, a una temperatura de 103 °C, hasta obtener peso constante. Posteriormente se calculó la masa anhidra de las muestras testigo con el objetivo de obtener, a través de pesadas, la humedad durante el proceso de secado.

2.3.3. Ensayos a Escala Industrial

Se utilizó madera proveniente del mismo rodal que para los ensayos a escala piloto. La madera en trozas fue aserrada en espesores de 25 y 50 mm y 3,1 m de largo. Los ensayos se realizaron en un horno de secado convencional de 10 m³ de capacidad en el Centro de Formación Técnica Lota Arauco.

Se efectuaron 2 ensayos de secado industrial, uno para cada espesor. Un total de 900 y 500 piezas fueron secadas en los ensayos de 25 y 50 mm de espesor, respectivamente.

Se midió la contracción, la heterogeneidad de la humedad final, los gradientes de humedad, las tensiones de secado, las grietas y los cambios de color, en base a las mismas adaptaciones presentadas anteriormente para los ensayos a escala piloto (Tablas N° 12 y N° 13).

Los alabeos se evaluaron según las especificaciones en la Tabla N° 15 (NCh 993). Para estas evaluaciones se utilizaron 55 y 40 piezas de 25 y 50 mm de espesor, respectivamente.

Tabla N° 15. Alabeos Admisibles para 3,1 m de Largo

Alabeo	Espesor (mm)	Sin Alabeo (mm)	Leve (mm)	Moderado (mm)	Intenso (mm)
Acanaladura	25	0	1-3	3-6	>6
	50	0	1-3	3-6	>6
Arqueadura	25	0	1-30	30-60	>60
	50	0	1-15	15-30	>30
Encorvadura	25	0	1-6	6-12	>12
	50	0	1-6	6-12	>12
Torcedura	25	0	1-6	6-10	>10
	50	0	1-6	6-10	>10

La humedad de la madera durante el secado industrial fue recogida con el mismo método aplicado en los ensayos a escala piloto.

2.4. RESULTADOS

2.4.1. Secado a Escala de Laboratorio

Los programas de secado tentativos para el pino ponderosa fueron adaptados de la literatura (Boone *et al.*, 1988). Se aplicaron programas de secado convencional y acelerado a madera de 25 y 50 mm de espesor (Tabla N° 16).

El programa de secado convencional fue considerado para reducir los problemas de coloración café. El programa acelerado, en tanto, buscaba optimizar el tiempo de secado. En ambos programas se utilizó una velocidad del aire de 3 m/s.

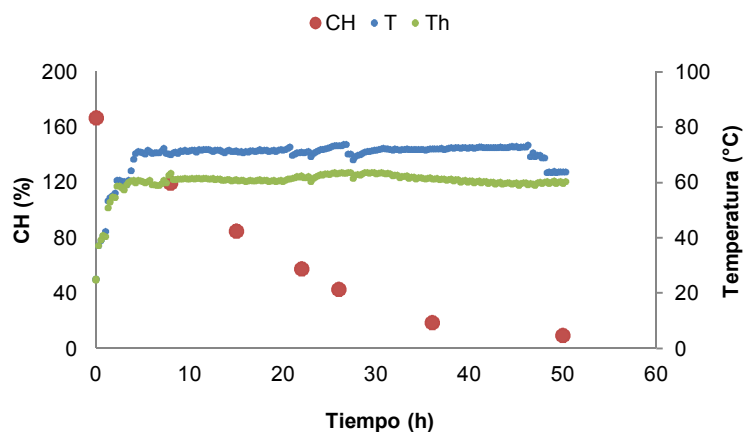
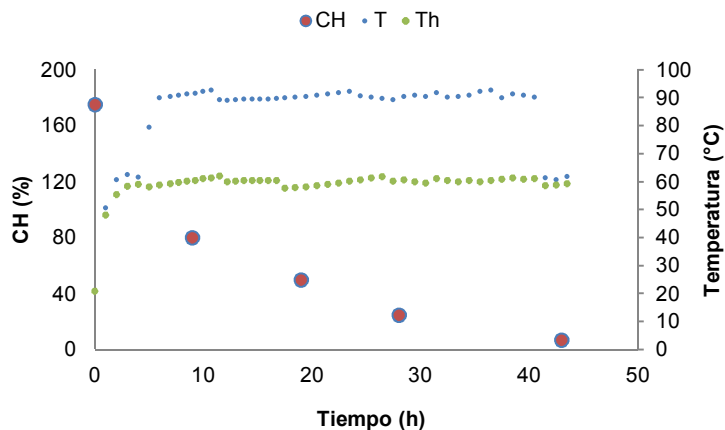
Tabla N° 16. Programas de Secado para 25 y 50 mm de Espesor

CH (%)	Convencional (SC)		Convencional Acelerado (SCA)	
	T (°C)	T _H (°C)	T (°C)	T _H (°C)
Calentamiento	60	60	60	60
Verde-10	70	60	90	60
10	60	60	60	60

CH: Contenido de humedad T: Temperatura del bulbo seco

T_H: Temperatura bulbo húmedo

La evolución del contenido de humedad y las condiciones de secado de la madera aserrada de 25 mm se registran en las Figuras N° 13 y N° 14.

**Figura N° 13. Curva de Secado Convencional, 25 mm****Figura N° 14. Curva de Secado Acelerado, 25 mm**

La variación del contenido de humedad y las condiciones de secado para la madera de 50 mm se registran en las Figuras N° 15 y N° 16.

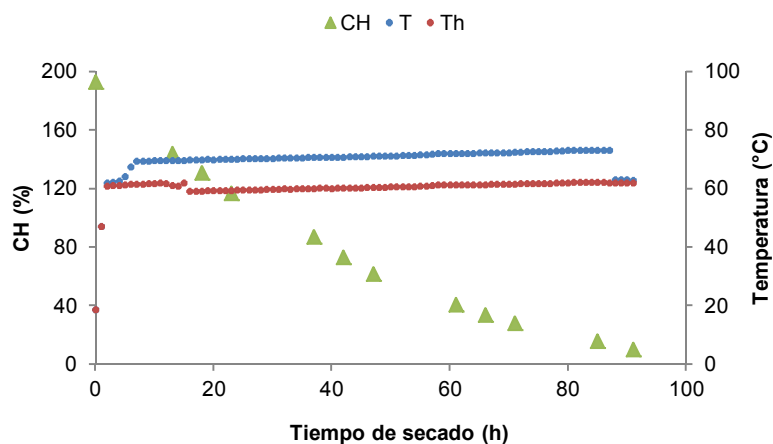


Figura N° 15. Curva de Secado Convencional, 50 mm

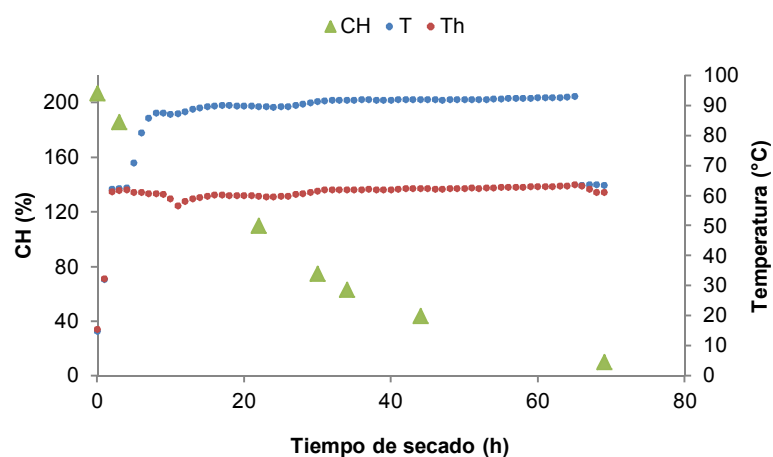


Figura N° 16. Curva de Secado Acelerado, 50 mm

Las curvas de secado a escala piloto muestran que el pino ponderosa de 25 y 50 mm de espesor alcanza rápidamente la temperatura de bulbo húmedo (60°C). Al finalizar la etapa de secado, la madera fue acondicionada por 3 a 4 horas en un ambiente saturado a 60°C.

La duración del secado para la madera de 25 mm de espesor fue 45 horas para el programa acelerado y 50 horas para el programa convencional. En 50 mm, la duración fue 69 y 91 horas para los programas acelerado y convencional, respectivamente. En este último programa se utilizó madera fresca recién aserrada, lo que explica la duración del secado.

De acuerdo a los resultados de los primeros 4 ensayos a escala de laboratorio, se repitieron los programas de secado acelerado para 25 mm (Figura N° 17) y convencional para 50 mm (Figura N° 18). En ambos ensayos se utilizó una velocidad del aire de 3 m/s y se aplicó un acondicionamiento final de 4 horas en un ambiente saturado a 90°C.

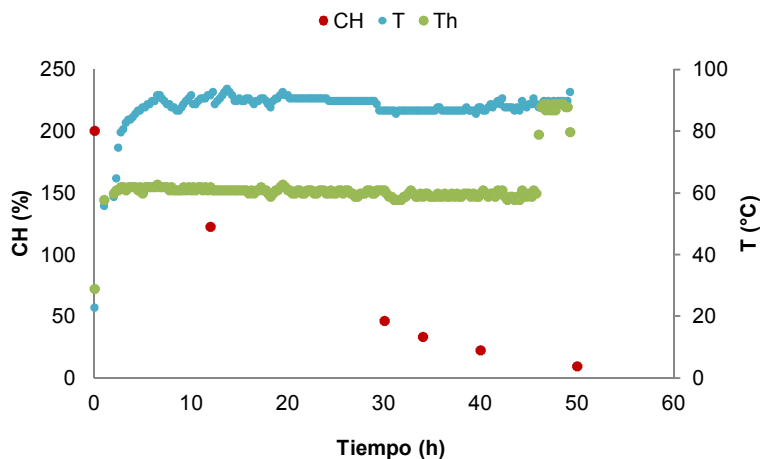


Figura N° 17. Curva de Secado Acelerado, Repetición 25 mm

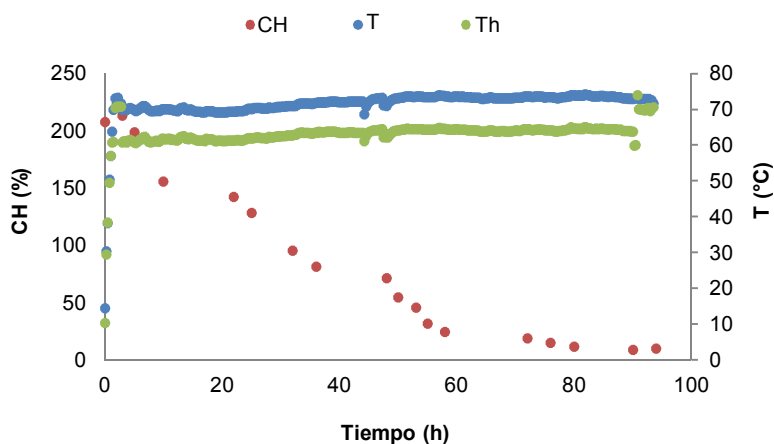


Figura N° 13. Curva de Secado Convencional, Repetición 50 mm

Los tiempos de secado en los programas de repetición a nivel experimental fueron de 50 y 95 horas para la madera de 25 y 50 mm, respectivamente.

2.4.2. Secado a Escala Industrial

A escala industrial, para madera de 25 mm, se ensayó un secado convencional acelerado 90/60 °C/°C, considerando una velocidad del aire de 5 m/s, que buscaba optimizar el tiempo de secado.

En madera de 50 mm se ensayó un secado convencional 70/60 °C/°C, con una velocidad de aire de 3 m/s, que buscaba minimizar la coloración café.

En los 2 ensayos se aplicó un acondicionado de 4 horas en un ambiente saturado a 70°C.

Las curvas de secado de los ensayos industriales se registran en las Figuras N° 19 y N° 20.

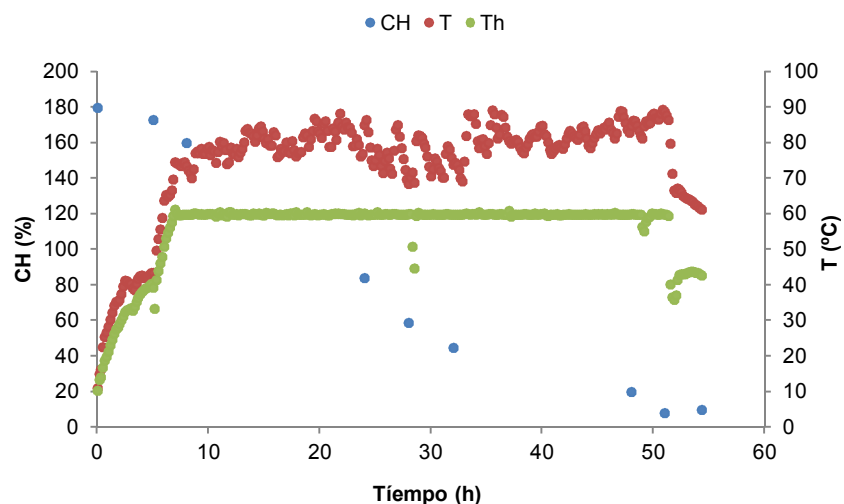


Figura N° 19. Curva de Secado Industrial Acelerado, 25 mm

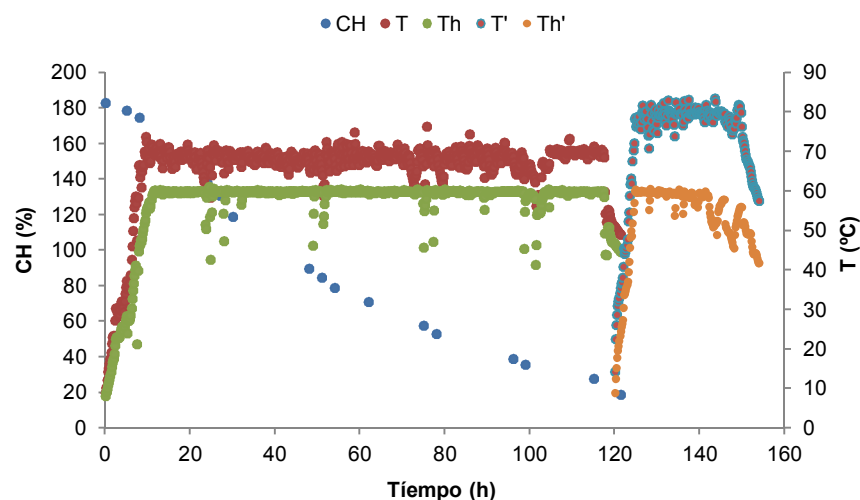


Figura N° 20. Curva de Secado Industrial Convencional, 50 mm

A escala industrial, con madera de 25 mm, bajo un secado convencional acelerado, el proceso demandó 55 horas, extendiéndose por 5 horas más que el secado piloto de repetición. Con madera de 50 mm, bajo condiciones de secado convencional, el proceso fue más lento, prolongándose por 150 horas, 55 horas adicionales respecto del secado de repetición a escala piloto.

No obstante lo anterior, el proceso de secado se encuentra en el rango de tiempo de hasta 6 días (144 horas) sugerido en la literatura para el secado convencional de pino ponderosa de 50 mm de espesor (Simpson 2001).

De la misma forma, Wagner *et al.*, (2008) proponen un programa a temperatura convencional para minimizar la coloración café en pino ponderosa de 38 mm que dura 5 días (128 horas).

2.4.3. Contracción al Final del Secado

La magnitud de la contracción al final del secado se indica en la Tabla N° 17.

A escala piloto, en el secado convencional para madera de 25 mm la contracción radial fue 2,8% y la tangencial de 4,0%. En 50 mm, secado convencional (inicial y repetición), la contracción radial varió entre 3,0% y 3,5% y la contracción tangencial entre 5,2% y 4,9%. En el secado acelerado de repetición, la madera de 25 mm presentó contracciones de 3,3% y 4,6% en las direcciones radial y tangencial, respectivamente. En 50 mm, bajo condiciones de secado acelerado, la contracción radial fue 3,5% y la tangencial de 5,4%. El secado acelerado sube levemente los niveles de contracción.

A escala industrial los niveles de contracción fueron similares a los observados en el laboratorio. Para madera de 25 mm se registraron contracciones radiales y tangenciales de 3,1% y 4,5%, respectivamente. En el caso de 50 mm las contracciones fueron de 3,4% y 5,6% en las direcciones radial y tangencial, respectivamente. Estos valores son comparables a los reportados en la literatura (Cockrell y Howard 1968, Simpson 2001, Ross 2010). Los resultados confirmaron que los cambios dimensionales en el pino ponderosa son bajos, lo que la hace estable dimensionalmente.

Tabla N° 17. Magnitud de la Contracción

Espesor (mm)	Ensayo	Contracción (%)	
		Radial	Tangencial
25	SC	2,8 (0,8)	4,0 (0,7)
	SCA	3,0 (0,8)	4,4 (0,6)
	SCA-R	3,3 (0,7)	4,6 (0,5)
	SCA-I	3,1 (0,5)	4,5 (0,6)
50	SCA	3,5 (0,8)	5,4 (0,7)
	SC	3,0 (0,6)	5,2 (0,7)
	SC-R	3,5 (0,7)	4,9 (0,5)
	SC-I	3,4 (0,9)	5,6 (0,7)

Desviación estándar entre paréntesis

SC-R: Secado convencional repetición

SC-I: Secado convencional industrial

SCA-R: Secado convencional acelerado repetición

SCA-I: Secado convencional acelerado industrial

2.4.4. Evaluación de la Calidad del Secado

Respecto de los 4 primeros ensayos de secado a escala de laboratorio, es decir, convencional y convencional acelerado, para 25 y 50 mm de espesor:

- La homogeneidad de la humedad final fue relativamente uniforme en ambos espesores y condiciones de secado (Tabla N° 18).
- El gradiente de humedad más bajo se registró con el programa de secado convencional, tanto para madera de 25 y 50 mm.

- Las menores tensiones de secado se obtuvieron con el programa convencional acelerado y convencional, para 25 y 50 mm, respectivamente

En los ensayos de repetición a escala de laboratorio, para madera de 25 mm de espesor, secada con un programa convencional acelerado, el contenido de humedad se concentró en la calidad "secado", mientras que el gradiente de humedad y las tensiones de secado se agruparon en la calidad "exclusiva". En el ensayo convencional para 50 mm, el contenido de humedad se concentró en la calidad "exclusiva", el gradiente de humedad presentó la mitad de las piezas en la calidad "secado" y el porcentaje restante en la calidad "exclusiva". Las tensiones de secado presentaron el mismo comportamiento que la madera de 25 mm.

A escala industrial, los mejores indicadores de calidad se registraron en el secado convencional acelerado, espesor 25 mm, específicamente en el contenido y gradiente de humedad. El comportamiento de las tensiones de secado fue mejor en el secado convencional, espesor 50 mm.

Con el objetivo de mejorar la calidad de las tensiones de secado, en ambos ensayos industriales se aplicaron acondicionados finales de 4 horas de duración. Para 25 y 50 mm se consideraron ambientes saturados de 70 y 90°C, respectivamente.

Tabla N° 18. Evaluación de Humedad, Gradiente y Tensiones

Espesor (mm)	Ensayo	CH (%)			GH (%)			TFS (%)		
		Est	Sec	Exc	Est	Sec	Exc	Est	Sec	Exc
25	SC	0	6	94	0	13	87	25	69	6
	SCA	0	20	80	0	33	67	68	32	0
	SCA-R	4	71	25	0	0	100	0	0	100
	SCA-I	0	50	50	0	0	100	62	38	0
50	SCA	2	14	84	0	25	75	38	56	6
	SC	0	2	98	0	0	100	6	81	13
	SC-R	22	38	40	0	50	50	0	0	100
	SC-I	30	20	50	30	10	60	20	60	20

Exc: Calidad exclusiva Sec: Calidad secado Est: Calidad estándar

En los ensayos a escala piloto e industrial, las grietas internas, superficiales y en los extremos fueron prácticamente imperceptibles (Tabla N° 19). Las referencias bibliográficas dan cuenta de la escasa propensión a las grietas de esta especie (Knauss 1957). No obstante lo anterior, se observó una tendencia a las grietas en los nudos.

La tendencia a los cambios de color durante el secado se destaca en la Tabla N° 19. Si bien a escala de laboratorio no se observó claramente que la coloración café se intensificara con la temperatura de secado, según la literatura un aumento de ella incrementaría la coloración café durante el secado (Wagner *et al.*, 2008). Entonces, reducir el impacto de la temperatura sobre los cambios de color durante el secado fue una de las razones que promovió la utilización de un programa de secado convencional en madera de 50 mm.

El ensayo industrial con 50 mm (convencional) no registró piezas con coloración café. Por el contrario, el secado industrial con 25 mm (convencional acelerado) registró todas las piezas de evaluación con la calidad "intenso".

Tabla N° 19. Evaluación de Grietas y Cambios de Color

Espesor (mm)	Ensayo	GI				GS				GE				CC			
		s/d	L	M	I	s/d	L	M	I	s/d	L	M	I	s/d	L	M	I
25	SC	100	0	0	0	99	0	0	1	100	0	0	0	0	25	38	37
	SCA	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	37	38	25
	SCA-R	100	0	0	0	96	4	0	0	100	0	0	0	0	38	25	37
	SCA-I	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100
50	SC	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	13	25	62
	SCA	100	0	0	0	99	0	0	1	100	0	0	0	0	37	0	63
	SC-R	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	0	25	75	0
	SC-I	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0

s/d: Sin defecto; L: Leve; M: Moderado; I: Intenso

Respecto de los alabeos (Tabla N° 20), considerando los 6 ensayos a escala piloto:

- Se mantuvo la tendencia para la torcedura. En 25 mm se registraron calidades “leve” y “moderado”, con predominio de las primeras. En 50 mm las calidades se concentraron en “leve”, “moderado” e “intenso”, con distribuciones similares para las últimas dos.
- La encorvadura y la arqueadura fueron de menor magnitud, en consideración al largo de la madera ensayada. Tal como lo reporta la literatura, este defecto es limitado durante el secado de pino ponderosa y no degrada de manera importante la calidad de la madera (Knauss y Clarke 1961).
- El comportamiento de la acanaladura frente al secado fue consistente con la relativamente baja contracción tangencial (1,5 – 2,0 veces la contracción radial) observada durante el secado.

En el ensayo industrial con 25 mm no se registró acanaladura. La arqueadura y la torcedura afectaron levemente la calidad de la madera y la encorvadura fue algo más intensa.

En 50 mm, la acanaladura predomina en la calidad “sin defecto”. La arqueadura y encorvadura fueron similares, con predominio de las calidades “sin defecto”, “leve” y “moderado”. La torcedura fue el alabeo más intenso.

Tabla N° 20. Evaluación de Alabeos

Espesor (mm)	Ensayo	Acanaladura				Arqueadura				Encorvadura				Torcedura			
		s/d	L	M	I	s/d	L	M	I	s/d	L	M	I	s/d	L	M	I
25	SC	0	88	12	0	0	100	0	0	0	95	5	0	0	63	37	0
	SCA	0	17	77	6	0	100	0	0	0	100	0	0	4	75	17	4
	SCA-R	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	83	13	4
	SCA-II	100	0	0	0	0	100	0	0	0	89	11	0	0	100	0	0
50	SC	0	92	8	0	0	100	0	0	0	75	25	0	0	58	17	25
	SCA	0	46	50	4	0	100	0	0	0	92	8	0	0	54	33	13
	SC-R	58	42	0	0	0	71	21	8	0	100	0	0	0	58	17	25
	SC-I	97	3	0	0	25	65	10	0	23	55	22	0	33	36	18	13

2.5. CONCLUSIONES

El pino ponderosa de 25 y 50 mm de espesor se deja secar satisfactoriamente con programas de secado convencional acelerado y convencional, respectivamente.

El secado convencional reduce los problemas de cambio de color, pero extiende la duración del proceso, por lo que se debe encontrar un buen compromiso entre ambas variables para no prolongar demasiado la duración del programa a baja temperatura, y tampoco degradar excesivamente la madera por el secado rápido.

La contracción transversal del pino ponderosa es relativamente baja (1,5% a 2,0%), lo que favorece la estabilidad dimensional y la escasa propensión a la acanaladura de la madera aserrada durante el secado.

Las grietas internas, superficiales y en los extremos, no afectan la calidad del pino ponderosa sometido a programas de secado convencional y acelerado.

2.6. REFERENCIAS

Álvarez, H. y Fernández, J., 1992. Fundamentos Teóricos del Secado de la Madera. Monografía INIA N° 82.

Boone, R. S.; Kozlik, C. J.; Bois, P. J.; and Wengert, E. M., 1988. Dry Kiln Schedules for Commercial Woods. Temperate and tropical. USDA, FPL-GTR-57.

Cockrell, R. and Howard, R., 1968. Specific Gravity and Shrinkage of Open Grown Ponderosa Pine. Wood Science Technology 2:292-298.

Knauss, A., 1957. Seasoning Degrade in Kiln-Drying Ponderosa Pine in South Central Oregon. PNW Research Note No. 136, 11p.

Knauss, A. and Clarke, E., 1961. Seasoning and Surfacing Degrade in Kiln-Drying Ponderosa Pine in Eastern Washington. PNW Research Note No. 205, 12p

Ross, R. J., 2010. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. USDA Forest Service., Forest Products Laboratory. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL- GTR-190, 509 p.

Simpson, W., 2001. Dry Kiln Operator's Manual. USDA Agricultural Handbook AH-188. 274p.

Wagner, F.; Smith, N. and McDonald, A., 2008. Initial High-Temperature Schedule to Reduce Drying Time and Control Kiln Brown Stain in Ponderosa Pine Shop Lumber. Forest Prod J 58(12):29-32.

Welling, J., 1994. Drying Quality Assessment and Specification. A Challenge for the Future. 4th IWDC: 297-304.

CAPÍTULO III. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

**William A. Gacitúa, UBB; Patricio A. Elgueta, INFOR.
y Gonzalo J. Hernández, INFOR.**

Conocer las propiedades físicas y mecánicas de cualquier especie maderera es fundamental para proyectar adecuadamente sus aplicaciones industriales.

Maderas con buenas propiedades pueden ser utilizadas como materia prima para la construcción de viviendas, puentes, elaboración de pisos, entre otras aplicaciones. Por el contrario, maderas con bajos indicadores pueden ser destinadas a la fabricación de molduras, revestimientos, tableros, etc.

3.1. OBJETIVOS GENERALES

Determinar las propiedades físicas y mecánicas del pino ponderosa de la región de Aysén, estados verde y seco (12%).

Clasificar las propiedades físicas y mecánicas de acuerdo a la metodología de Sallenave.

3.2. MATERIAL Y MÉTODO

Un total de 9 trozas fueron utilizadas en este estudio, obtenidas de árboles seleccionados en la Reserva Nacional Coyhaique, Región de Aysén. Las Tablas N° 1 y N° 2 (Capítulo I) indican antecedentes prediales, dasométricos y de manejo del rodal.

Las trozas fueron enviadas a la Universidad del Bío-Bío, sede Concepción, donde fueron aserradas en el Pabellón Tecnológico de la Madera (PTM) de acuerdo con las indicaciones de la norma ASTM S5536, método secundario.

Se obtuvieron 6 piezas por troza, identificando cada una de ellas de acuerdo a la troza de origen.

La madera utilizada en la elaboración de probetas a ensayar en la condición seca fue encastillada bajo techo durante 60 días, a temperatura ambiente, y posteriormente secada en cámara por 24 horas a una temperatura de 40°C.

La madera para elaborar probetas a ensayar en condición verde fue sumergida en agua por 30 días, asegurando un contenido de humedad superior al 100%.

Las probetas fueron elaboradas de acuerdo a la norma ASTM D143, con un total de 222 y 239 unidades para los ensayos en condición seca y verde, respectivamente.

En la Tabla N° 21 se indica los ensayos ejecutados y las determinaciones obtenidas para cada condición de humedad, seca y verde.

Tabla N° 21. Resumen de los Ensayos Ejecutados

Ensayo	Determinaciones	N° de Ensayos
Flexión	Módulo de elasticidad	20
	Módulo de ruptura	
Compresión	Paralela	20
	Perpendicular	20
Cizalle paralelo	Radial	20
	Tangencial	20
Dureza	Paralela	20
	Perpendicular	
Clivaje	Radial	20
	Tangencial	20
Tracción normal	Radial	20
	Tangencial	20
Extracción de clavo	Paralela	20
	Perpendicular	

A cada probeta se le determinó el contenido de humedad (ASTM D4442) y la densidad (ASTM D2395). A las probetas en estado seco se les midió la densidad aparente (masa y volumen al 12%) y la nominal (masa anhidra y volumen al 12%), y a las de condición verde la densidad básica.

Los resultados obtenidos al ensayar las probetas en estado seco, con registros de humedad entre 10% y 11%, fueron ajustados al 12%. En el caso del ensayo de tracción normal no se aplicó el procedimiento indicado ya que su respuesta es errática a los cambios de contenido de humedad.

La ecuación utilizada para ajustar los resultados al 12% de humedad es la que se indica (Forest Products Laboratory, 2010).

$$P = P_{12} \left(\frac{P_{12}}{P_g} \right)^{\left(\frac{12-M}{M_p-12} \right)}$$

Donde:

- P = Propiedad mecánica bajo el 12% de contenido de humedad.
 P₁₂ = Propiedad mecánica al 12% de contenido de humedad.
 P_g = Propiedad mecánica en estado verde.
 M = Contenido de humedad bajo el 12%.
 M_p = Contenido de humedad al cual las propiedades mecánicas comienzan a variar desde estado verde a seco. Un valor igual a 21 fue considerado para el Pino ponderosa (Forest Products Laboratory, 2010).

Los ensayos físicos y mecánicos de las probetas estandarizadas fueron realizados en el Centro de Biomateriales y Nanotecnología de la Universidad el Bío-Bío.

Se utilizaron 2 máquinas de ensayo universal en las determinaciones: Zwick Roell e Instron, de 2.000 y 4.000 kg de capacidad, respectivamente.

Una vez obtenidos los resultados, se utilizó la metodología de Sallenave (1955) para clasificar el pino ponderosa de acuerdo con sus propiedades físicas y mecánicas.

Las características que permitieron clasificar el comportamiento de la madera a través de este método, son las siguientes:

3.2.1. Densidad

La densidad aparente (12%) define 5 clases de madera (Tabla N° 22).

Tabla N° 22. Densidad Aparente

Clase	Densidad Aparente (g/cm ³)
	Conífera
Muy Liviana	< 0,400
Liviana	0,400 - 0,499
Semi-pesada	0,500 - 0,599
Pesada	0,600 - 0,700
Muy pesada	> 0,700

3.2.2. Dureza

La Dureza es una de las características fundamentales de la madera, por estar estrechamente relacionada con su trabajabilidad. A mayor dureza, mayor es la dificultad de procesamiento.

La magnitud de la Dureza (JANKA) define 3 clases de madera (Tabla N° 23).

Tabla N° 23. Dureza Normal a la Fibra

Especie	Dureza Normal a la Fibra (kg)	Clase
Coníferas	136 – 272	Blandas
	272 – 545	Semi - duras
	545 - 2.724	Duras

El cociente entre la Dureza Normal y la Densidad Aparente define la característica “cota de dureza”.

$$CD = \frac{R_{dn}}{D_{12}^2}$$

Donde:

CD = Cota de dureza.

R_{dn} = Dureza normal a las fibras (kg).

D_{12}^2 = Densidad aparente (g/cm³).

La Cota de Dureza define 3 tipos de aplicaciones para la madera (Tabla N° 24).

Tabla N° 24. Cota de Dureza

Cota de Dureza	Clasificación	Tipo de Comparación
408 a 817	Pequeña	Madera de carpintería
817 a 1.226	Normal	Madera industrial
1.226 a 1.634	Fuerte	Madera para usos especiales

3.2.3. Flexión Estática

La magnitud del Módulo de Ruptura define 3 clases (Tabla N° 25).

Tabla N° 25. Módulo de Ruptura

Clase	MOR _F (kg/cm ²)
Pequeña	< 784
Mediana	784 - 1.283
Grande	> 1.283

El cociente entre el Módulo de Ruptura y la Densidad Aparente define la característica “cota de flexión”.

$$CF = \frac{MOR_F}{100 \cdot D_{12}}$$

Donde:

CF = Cota de flexión.

MOR_F = Módulo de ruptura en flexión (kg/cm²).

D₁₂ = Densidad aparente (g/cm³).

La Cota de Flexión define 3 tipos de aplicaciones para la madera (Tabla N° 26).

Tabla N° 26. Cota de Flexión

Calidad	Cota de Flexión	Aplicaciones
Pequeña	7,1 - 10,7	Madera impropia para carpintería
Mediana	10,7 - 14,3	Madera mediana para carpintería
Grande	14,3 - 17,8	Madera buena para carpintería

El cociente entre el Módulo de Ruptura en Flexión y la Resistencia a la Compresión Paralela define la característica “cota de tenacidad”.

$$CT = \frac{1,459 \cdot MOR_F}{R_{cp}}$$

Donde:

CT = Cota de tenacidad.

MOR_F = Módulo de ruptura en flexión (kg/cm²).

R_{cp} = Resistencia a la compresión paralela (kg/cm²).

La Cota de Tenacidad define 3 tipos de tenacidad en la madera (Tabla N° 27).

Tabla N° 27. Cota de Tenacidad

Calidad	Cota Tenacidad
Poco tenaz	< 2
Medianamente tenaz	2 – 3
Muy tenaz	3 – 4

3.2.4. Compresión Paralela a la Fibra

El cociente entre la Tensión Máxima en Compresión y la Densidad Aparente define la característica “cota de calidad estática”.

$$CCE = \frac{R_{cp}}{100 \cdot D_{12}}$$

Donde:

CCE = Cota de calidad estática.

R_{cp} = Tensión máxima en compresión (kg/cm²).

D₁₂ = Densidad aparente (g/cm³).

La Cota de Calidad Estática define 3 calidades de la madera (Tabla N° 28).

Tabla N° 28. Cota de Calidad Estática

Clase	Tensión Máxima en Compresión (kg/cm ²)	Cota Calidad Estática		
		Ligera	Semi-pesada	Pesada
Inferior	260 - 364	< 8,3	< 7,3	< 6,2
Mediana	365 - 468	8,3 - 9,9	7,3 - 8,8	6,2 - 7,8
Superior	> 468	> 9,9	> 8,8	> 7,8

3.2.5. Clivaje Unitario

El clivaje es una de las características mecánicas que mide la cohesión transversal de las fibras de la madera. Esta propiedad influye directamente en las uniones estructurales, las cuales dependen en gran medida de su resistencia al clivaje o de la resistencia al cizalle.

La magnitud de la Resistencia al Clivaje define 3 clases (Tabla N° 29).

Tabla N° 29 Resistencia al Clivaje

Clase	Resistencia al Clivaje (kg/cm)
Pequeña	< 62
Mediana	62 - 124,5
Grande	> 124,5

El cociente entre la Resistencia al Clivaje y la Densidad Aparente define la característica “cota de laminabilidad”.

$$CL = \frac{R_{cl}}{100 \cdot D_{12}}$$

Donde:

CL = Cota de laminabilidad.

R_{cl} = Resistencia al clivaje (kg/cm).

D_{12} = Densidad aparente (g/cm^3).

La Cota de Laminabilidad define 3 aplicaciones de la madera (Tabla N° 30).

Tabla N° 30. Cota de Laminabilidad

Clase	Cota de Laminabilidad	Aplicaciones
Muy laminable	0,416 - 0,832	Madera fácil de rajar
Medianamente laminable	0,833 - 1,248	Madera de uso corriente
Poco laminable	1,248 - 1,664	Madera industrial o para usos especiales

3.3. RESULTADOS

En las Tablas N° 31 y N° 32 se registran los resultados obtenidos a partir de los ensayos de las propiedades físico-mecánicas, estados seco y verde.

En estado seco, las propiedades mecánicas de flexión, compresión, cizalle paralelo, dureza, clivaje y tracción normal fueron mayores que los obtenidos en estado verde, con un 33,0%, 34,3%, 50,5%, 47,5%, 21,9% y 38,0%, respectivamente. En estado verde, la propiedad mecánica de extracción de clavo fue mayor que en estado seco, con un 7,8%.

Las densidades básica, nominal y aparente promedio del pino ponderosa de Aysén fueron 0,34, 0,36 y 0,40 g/cm^3 , respectivamente. Al comparar las densidades obtenidas a nivel local con aquellas publicadas por Forest Products Laboratory (2010) para el pino ponderosa que crece en EE.UU. (0,38 g/cm^3 básica y 0,4 g/cm^3 aparente), se observa una diferencia promedio de un 11% en la densidad básica, siendo mayor para la especie norteamericana.

Tabla N° 31. Propiedades Físicas y Mecánicas en Estado Seco

Propiedad		Unidad	Promedio	^b D.E.	Número de Probetas	^a Valor Ajustado
Ensayo	Determinación					
FLEXIÓN	MOR	kPa	49.182	8.223	20	45.611
	MOE	MPa	3.873	1.123		3.795
	Contenido de humedad	%	11	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,40	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,37	-		-
COMPRESIÓN	Paralela	kPa	26.678	3.811	20	24.187
	Contenido de humedad	%	11	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,33	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,31	-		-
	Perpendicular	kPa	3.108	1.396	20	-
	Contenido de humedad	%	12	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,41	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,37	-		-
CIZALLE PARALELO Tensión máxima	Radial	kPa	6.960	1.140	20	6.455
	Contenido de humedad	%	11	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,40	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,36	-		-
	Tangencial	kPa	9.061	1.136	20	-
	Contenido de humedad	%	12	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,44	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,37	-		-
DUREZA	Paralelo	N	2.730	369	20	-
	Perpendicular	N	1.669	374		-
	Contenido de humedad	%	12	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,39	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,36	-		-
CLIVAJE Resistencia máxima	Radial	N/mm	20,57	4,13	20	-
	Contenido de humedad	%	12	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,37	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,35	-		-
	Tangencial	N/mm	28,37	5,61	20	27,27
	Contenido de humedad	%	11	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,42	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,39	-		-
*TRACCIÓN NORMAL Tensión máxima	Radial	kPa	1.119	327	20	-
	Contenido de humedad	%	11	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,41	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,35	-		-
	Tangencial	kPa	2.076	709	20	-
	Contenido de humedad	%	11	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,40	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,35	-		-

EXTRACCIÓN DE CLAVO Carga máxima	Paralelo	kN	0,096	0,03	20	0,096
	Perpendicular	kN	0,148	0,06		0,153
	Contenido de humedad	%	10	-		-
	Densidad aparente	g/cm ³	0,40	-		-
	Densidad nominal	g/cm ³	0,36	-		-

^a Valor ajustado al 12% C.H. (Forest Products Laboratory, 2010) ^b Desviación estándar

* Ecuación de ajuste no recomendada para esta propiedad mecánica

MOR: Módulo de ruptura MOE: Módulo de elasticidad

Tabla N° 32. Propiedades Físicas y Mecánicas en Estado Verde

Propiedad		Unidad	Promedio	^b D.E.	Número de Probetas
Ensayo	Determinación				
FLEXIÓN	MOR	kPa	23.147	2.581	20
	MOE	MPa	3.157	780	
	Contenido de humedad	%	218	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,33	-	
COMPRESIÓN	Paralela	kPa	10.014	1.417	20
	Contenido de humedad	%	214	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,33	-	
	Perpendicular	kPa	2.795	1.117	20
	Contenido de humedad	%	176	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,35	-	
CIZALLE PARALELO Tensión máxima	Radial	kPa	3.275	307	20
	Contenido de humedad	%	236	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,30	-	
	Tangencial	kPa	4.376	463	20
	Contenido de humedad	%	202	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,33	-	
DUREZA	Paralelo	N	1.193	145	20
	Perpendicular	N	1.022	173	
	Contenido de humedad	%	196	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,33	-	
CLIVAJE Resistencia máxima	Radial	N/mm	17,67	1,75	20
	Contenido de humedad	%	197	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,34	-	
	Tangencial	N/mm	19,15	3,04	20
	Contenido de humedad	%	197	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,34	-	
TRACCIÓN NORMAL Tensión máxima	Radial	kPa	840	156	20
	Contenido de humedad	%	120	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,35	-	
	Tangencial	kPa	1.016	273	20
	Contenido de humedad	%	169	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,38	-	
EXTRACCIÓN DE CLAVO Carga máxima	Paralelo	kN	0,098	0,08	20
	Perpendicular	kN	0,177	0,11	
	Contenido de humedad	%	206	-	
	Densidad básica	g/cm ³	0,34	-	

^b Desviación estándar MOR: Módulo de ruptura MOE: Módulo de elasticidad

En la Tabla N° 33 se registran las propiedades mecánicas del pino ponderosa que crece en Estados Unidos (Forest Products Laboratory, 2010) y en la Región de Aysén.

En estado seco, la madera de pino ponderosa de EE.UU. registra resistencias en flexión y en compresión superiores a su homólogo nacional, con una diferencia promedio de un 40,4% y 24,8%, respectivamente. En cizalle paralelo y dureza ocurre lo contrario, con una diferencia promedio de 2,63% y 9,05%, respectivamente.

En estado verde, la madera de pino ponderosa de EE.UU. registra valores de resistencia superiores en comparación con la especie nacional, en flexión, compresión paralela, cizalle paralelo y dureza, con una diferencia promedio de 44,06%, 40,75%, 20,29% y 21,86%, respectivamente. En compresión perpendicular se observó un resultado inverso, con una diferencia promedio de 32,02%.

Tabla N° 33. Propiedades del Pino Ponderosa de Aysén y EEUU

Propiedad		Unidad	Estado Seco		Estado Verde	
Ensayo	Determinación		Chile	EEUU	Chile	EEUU
FLEXIÓN	MOR	kPa	49.182	65.000	23.147	35.000
	MOE	MPa	3.873	8.900	3.157	6.900
COMPRESIÓN	Paralela	kPa	26.678	36.700	10.014	16.900
	Perpendicular	kPa	3.108	4.000	2.795	1.900
CIZALLE PARALELO	Radial	kPa	^a 8.011	^a 7.800	^a 3.826	^a 4.800
	Tangencial	kPa				
DUREZA	Paralela	N	^a 2.199	^a 2.000	^a 1.094	^a 1.400
	Perpendicular	N				

^a Valores promedio entre los planos radiales (paralelos) y tangenciales (Perpendiculares)

En la Tabla N° 34 se indican las propiedades físicas y mecánicas del pino ponderosa de Aysén y del pino radiata en Chile.

En estado seco, las propiedades mecánicas del pino radiata fueron mayores al pino ponderosa en todos los ensayos, excepto en el cizalle paralelo, plano tangencial, donde el resultado del pino ponderosa fue mayor en un 17,8%. En estado verde, las propiedades mecánicas del pino radiata fueron superiores al pino ponderosa en todos los indicadores.

En la Tabla N° 35 se resume las propiedades evaluadas mediante el método de Sallenave.

De acuerdo a la densidad aparente, la madera clasifica como liviana. Según la dureza normal a la fibra, la madera clasifica como blanda al igual que el pino radiata. La cota de dureza la clasifica como normal, es decir, madera para uso industrial.

Respecto de la flexión estática, el módulo de ruptura la clasifica en la calidad pequeña. La cota de flexión la define como mediana para carpintería. La cota de tenacidad la califica como medianamente tenaz.

En el ensayo de compresión paralela a las fibras, la madera clasifica como inferior. La cota estática la clasifica como semi-pesada. Para el caso del clivaje, la madera califica como pequeña. La cota de laminabilidad la clasifica como muy laminable.

Siguiendo el método de clasificación de Sallenave, en las Tablas N° 36 a N° 44 se agrupa a la especie pino ponderosa de Aysén con otras especies madereras del país.

Tabla N° 34. Propiedades del Pino Ponderosa de Aysén y de Pino Radiata en Chile**

Propiedad		Unidad	Estado Seco		Estado Verde***	
Ensayo	Determinación		<i>P. radiata</i>	<i>P. ponderosa</i>	<i>P. radiata</i>	<i>P. ponderosa</i>
FLEXIÓN	MOR	kPa	64.400	*45.611	35.010	23.147
	MOE	MPa	8.370	*3.795	6.423	3.157
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,370	0,448	0,330
COMPRESIÓN	Paralela	kPa	36.300	* 24.187	14.612	10.014
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,310	0,448	0,330
	Perpendicular	kPa	13.200	3.108	-	2.795
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,370	0,448	0,350
CIZALLE PARALELO Tensión máxima	Radial	kPa	6.670	*6455	4.315	3.275
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,360	0,448	0,300
	Tangencial	kPa	7.450	9.061	5.001	4.376
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,370	0,448	0,330
DUREZA	Paralelo	N	2.844	2.730	1.746	1.193
	Perpendicular	N	2.030	1.669	1.461	1.022
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,360	0,448	0,330
CLIVAJE Resistencia máxima	Radial	N/mm	32,36	20,57	28,43	17,67
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,350	0,448	0,340
	Tangencial	N/mm	43,15	*27,27	34,32	19,15
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,390	0,448	0,340
TRACCIÓN NORMAL Tensión máxima	Radial	kPa	2.350	1.119	2.550	840
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,350	0,448	0,350
	Tangencial	kPa	4.020	2.076	2.550	1.016
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,350	0,448	0,380
EXTRACCIÓN DE CLAVO Carga máxima	Paralelo	kN	0,275	*0,096	0,206	0,098
	Perpendicular	kN	0,392	*0,153	0,431	0,177
	Densidad Nominal	g/cm ³	0,448	0,360	0,448	0,340

* Valores ajustados al 12% contenido de humedad ** Valores obtenidos de INFOR (1991) *** Densidad básica
MOR: Módulo de ruptura MOE: Módulo de elasticidad

Tabla N° 35. Resumen Metodología de Sallenave para el Pino Ponderosa

Propiedad	Indicador	Valor Indicador	Cota	Valor Cota	Clasificación		
					Clase	Cota	Aplicación
Densidad (gr/cm ³)	Densidad aparente	0,4	-	-	Liviana	-	-
Dureza (kg)	Dureza normal a la fibra	170	Cota de dureza	1.064	Blanda	Normal	Madera industrial
Flexión estática (kg/cm ²)	MOR	465	Cota de flexión	11,6	Pequeña	Mediana	Madera mediana para carpintería
			Cota de tenacidad	2,8		Medianamente tenaz	-
Compresión paralela (kg/cm ²)	Tensión máxima en compresión	247	Cota de calidad estática	6,2	Inferior	Semi-pesada	-
Clivaje unitario (kg/cm)	Resistencia al clivaje unitario	24,41	Cota de laminabilidad	0,61	Pequeña	Muy laminable	Madera fácil de rajar

Tabla N° 36. Clasificación según Densidad Aparente

Clase	Especie	Densidad Aparente (kg/m ³)
Livianas ($400 < D_{12} < 499$)	Pino ponderosa	400
	Pino oregón	446
	Sequoia	464
Semi-pesadas ($500 < D_{12} < 599$)	Pino radiata	513
	Maño hojas cortas	521
	Maño hojas punzantes	522
	Alerce	542
	Ciprés de la cordillera	546
	Maño hojas largas	579
Pesadas ($600 < D_{12} < 700$)	Araucaria	672

Nota: Densidad aparente del pino radiata (INFOR, 1990)

Tabla N° 37. Clasificación según Dureza Normal

Clase	Especie	Dureza Normal R _{dn} (kg)
Blandas ($136 < R_{dn} < 272$)	Pino ponderosa	170
	Sequoia	238
	Alerce	250
	Pino radiata	265
Semi-duras ($272 < R_{dn} < 545$)	Pino oregón	280
	Ciprés de la cordillera	280
	Maño hojas punzantes	320
	Araucaria	339

Tabla N° 38. Clasificación según Cota de Dureza

Clase	Especie	Cota Dureza (CD)
Pequeña ($480 < CD < 817$)	Álamo	741
	Araucaria	751
	Roble	778
Normal ($500 \leq CD < 599$)	Lingue	825
	Alerce	851
	Ciprés de la cordillera	939
	Ulmo	945
	Coigüe	951
	Laurel	961
	Tepa	978
	Pino Radiata	1.007
	Aromo australiano	1.046
	Pino ponderosa	1.064
	Eucalipto	1.094
	Sequoia	1.105
	Maño hojas punzantes	1.174
	Raúl	1.219
Fuerte ($1.226 \leq CD$)	Pino oregón	1.408

Tabla N° 39. Clasificación según Módulo de Ruptura en Flexión

Calidad	Especie	MOR _F (kg/cm ²)
Pequeña (MOR _F < 784)	Pino ponderosa	465
	Álamo	519
	Alerce	602
	Avellano	625
	Ciprés de la cordillera	650
	Olivillo	704
	Laurel	706
	Canelo	706
	Pino radiata	715
	Mañío hojas punzantes	718
	Raulí	770
Mediana (784 < MOR _F < 1.283)	Pino oregón	792
	Coigüe	839
	Roble	848
	Lenga	876
	Lingue	924
	Ulmo	962
	Tepú	1.050
	Aromo australiano	1.117
	Eucalipto	1.198
Grande (1.283 < MOR _F)	Luma	1.300

Tabla N° 40. Clasificación según Cota de Flexión

Calidad	Especie	Cota de Flexión (CF)
Mediana (10,7 < CF < 14,3)	Roble	10,9
	Alerce	11,1
	Luma	11,3
	Araucaria	11,4
	Pino ponderosa	11,6
	Olivillo	11,8
	Ciprés de la Cordillera	11,9
	Álamo	12,0
	Coigüe	12,7
	Tepa	12,9
	Ulmo	13,2
	Mañío hojas punzantes	13,8
	Pino radiata	13,9
	Canelo	13,9
Grande (14,3 ≤ CF < 17,8)	Raulí	14,3
	Lenga	15,0
	Eucalipto	15,0
	Aromo australiano	17,3
	Pino oregón	17,8

Tabla N° 41. Clasificación según Cota de Tenacidad

Calidad	Especie	Cota de Tenacidad (CT)
Poco tenaz ($CT < 2$)	Sequoia	1,9
Medianamente tenaz ($2 \leq CT < 3$)	Alerce	2,0
	Ulmo	2,1
	Maño hojas punzantes	2,2
	Olivillo	2,2
	Roble	2,2
	Coigüe	2,3
	Luma	2,4
	Tepa	2,4
	Raúlí	2,4
	Araucaria	2,5
	Ciprés de la Cordillera	2,5
	Álamo	2,5
	Eucalipto	2,5
	Pino radiata	2,6
	Aromo australiano	2,7
	Canelo	2,8
	Pino ponderosa	2,8
Muy tenaz ($3 \leq CT < 4$)	Pino oregón	3,0
	Lenga	3,0
	Lingue	3,8

Tabla N° 42. Clasificación según Cota de Calidad Estática

Clase	Calidad	Especie	Cota de Calidad Estática (CCE)
Inferior ($260 < R_{cp}^* < 364$)	Semi-pesada ($7,3 < CCE$)	Pino ponderosa**	6,2
Mediana ($260 < R_{cp}^* < 364$)	Ligera ($8,8 < CCE < 9,9$)	Sequoia	9,5
	Semi-pesada ($7,3 < CCE < 8,8$)	Alerce	7,9
		Pino radiata	7,9
		Pino oregón	8,5
	Pesada ($6,2 < CCE < 7,3$)	Araucaria	6,6
		Ciprés de la cordillera	6,9
Superior ($468 < R_{cp}^*$)	Semi-pesada ($8,8 < CCE$)	Maño hojas punzantes	9,1

* Tensión máxima en compresión paralela (kg/cm^2)** Valor obtenido (247 kg/cm^2) inferior al tabulado

Tabla N° 43. Clasificación según Resistencia al Clivaje

Clase	Especie	Resistencia al Clivaje R_{cl} (kg/cm)
Pequeña ($R_{cl} < 62$)	Sequoia	20,6
	Pino ponderosa	24,4
	Pino oregón	25,3
	Álamo	39,3
	Aromo australiano	41,0
	Pino radiata	47,9
	Alerce	48,7
	Mañío hojas punzantes	50,0
	Renoval de raulí	50,0
	Canelo	59,0
Mediana ($62 \leq R_{cl} < 124,5$)	Lenga	63,5
	Araucaria	64,5
	Tepa	68,4
	Lingue	77,5
	Laurel	83,5
	Raulí	85,3
	Ulmo	94,5
	Olivillo	95,0
	Tíneo	97,4
	Coigüe	100,9
	Roble	113,2

Tabla N° 44. Clasificación según Cota de Laminabilidad

Clase	Especie	Cota de Laminabilidad (CL)
Muy laminable ($0,42 < CL < 0,83$)	Sequoia	0,44
	Pino oregón	0,57
	Pino ponderosa	0,61
	Aromo australiano	0,63
Medianamente laminable ($0,83 \leq CL < 1,25$)	Renoval de raulí	0,87
	Alerce	0,90
	Álamo	0,91
	Pino radiata	0,93
	Araucaria	0,96
	Mañío hojas punzantes	0,96
	Lenga	1,09
	Canelo	1,16
	Tepa	1,21
Poco laminable ($1,25 \leq CL < 1,66$)	Lingue	1,25
	Ulmo	1,30
	Laurel	1,42
	Roble	1,46
	Coigüe	1,52
	Raulí	1,58

3.4. CONCLUSIONES

Se determinaron las propiedades físicas y mecánicas para una muestra de 9 trozas de pino ponderosa de la Región de Aysén, estados seco y verde.

Las densidades básica, nominal y aparente son 0,34, 0,36 y 0,40 g/cm³, respectivamente.

Las propiedades mecánicas en estado seco son superiores a las obtenidas en estado verde, con la excepción del ensayo de extracción de clavos, donde ocurrió lo contrario.

En comparación con el pino ponderosa que crece en EE.UU (Forest Products Laboratory, 2010), la especie nacional presenta resultados superiores en los ensayos de dureza y cizalle paralelo, estado seco, y en compresión perpendicular, estado verde.

En comparación con el pino radiata de Chile (INFOR, 1991), el pino ponderosa de la Región de Aysén presenta un resultado superior en el ensayo de cizalle paralelo tangencial, estado seco.

El análisis mediante el método de Sallenave indica que la madera de pino ponderosa es apta para uso industrial y carpintería. Bajo el mismo análisis, 7 de 9 indicadores del pino radiata son superiores al pino ponderosa (Densidad, Dureza normal, Módulo de ruptura, Cota de flexión, Cota de calidad estática, Clivaje, Cota de laminabilidad).

3.5. REFERENCIAS

ASTM D143-94. 2000. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber.

ASTM D2395. Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Base Materials.

ASTM D4442. Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials.

ASTM D5536-94. 2004. Standard Practice for Sampling Forest Trees for Determination of Clear Wood Properties

Forest Products Laboratory. 2010. Wood Handbook-Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p.

Instituto Forestal. 1990. Propiedades y Usos de Especies Madereras de Corta Rotación. Instituto Forestal y Corporación de Fomento de la Producción. Informe Técnico N°122. Santiago, Chile.

Instituto Forestal. 1991. Manual de Construcciones en Madera. Instituto Forestal y Corporación de Fomento de la Producción. INFOR. N°10, Volumen N°2, 2^{da} edición. Santiago, Chile.

Sallenave, P. 1955. Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux de l'union Française. Centre Technique Forestier Tropical.

CAPÍTULO IV. DURABILIDAD NATURAL DE LA MADERA

Patricio A. Elgueta, INFOR, y Gonzalo J. Hernández, INFOR.

La durabilidad natural es la capacidad que posee la madera para resistir el ataque de agentes biológicos destructivos una vez puesta en servicio y sin ningún tipo de tratamiento de impregnación.

Las maderas que presentan baja durabilidad natural deben ser impregnadas con el objetivo de prolongar su vida útil.

4.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la durabilidad natural de la madera de pino ponderosa sometida a la acción de 4 tipos hongos, 2 de pudrición blanca y 2 de pudrición café.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar las categorías de durabilidad natural de la madera de albura y duramen, según la clasificación de Findlay (1962) y ASTM 2017-1985.

Determinar la necesidad de impregnar la madera aserrada de pino ponderosa para aplicaciones estructurales, de acuerdo a la normativa vigente en Chile.

4.3. MATERIAL Y MÉTODO

Los hongos utilizados corresponden a:

Pudrición blanca: *Trametes versicolor* (L. ex Fr.) Pilát
Pleurotus ostreatus (Jacq. Ex Fr.) Kummer

Pudrición café: *Gloeophyllum trabeum* (Pers. Ex Fr.) Murr
Postia placenta (Fr.) M. Larsen et Lombard.

El diseño experimental del estudio se detalla en la Tabla N° 45.

Tabla N° 45. Diseño Experimental

Tipo de Hongo	Especie	Nombre abreviado	Tipo de madera	Número de probetas
Pudrición Café	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	GT	Albura	20
			Duramen	20
	<i>Postia placenta</i>	PP	Albura	20
			Duramen	20
Pudrición Blanca	<i>Trametes versicolor</i>	TV	Albura	20
			Duramen	20
	<i>Pleurotus ostreatus</i>	PO	Albura	20
			Duramen	20

El ensayo se ejecutó en el Laboratorio de Micología del Instituto Forestal (INFOR), Sede Bío-Bío. Su instalación se realizó según indicaciones de la norma AWWPA E10-01.

Las actividades del estudio se iniciaron con el cultivo de los hongos de pudrición en un ambiente a 24 °C, durante 7 días (Figuras N° 21 a N° 24). Se usaron placas petri y PDA (potato dextrosa agar) como medio de crecimiento.



Figura N° 21. *Gloeophyllum trabeum*



Figura N° 22. *Postia placenta*



Figura N° 23. *Trametes versicolor*



Figura N° 24. *Pleurotus ostreatus*

Se utilizaron envases de vidrio de 500 cm³, con 200 cm³ de arena de Lampa y agua destilada hasta un 130% de la capacidad de campo (máxima capacidad de saturación del suelo) (Figura N° 25). Sobre la arena se dispusieron los sustratos alimenticios (58 x 37 x 4 mm), considerando albura de pino radiata para los hongos de pudrición café y albura de álamo para los hongos de pudrición blanca (Figura N° 26). Los envases y sus contenidos fueron esterilizados en un autoclave en dos oportunidades, durante 30 minutos, a una temperatura de 121 °C y una presión de y 1,2 atmosferas, con un intervalo de aproximadamente 24 horas (Figura N° 27).

Los sustratos se inocularon en un ambiente aséptico (Figura N° 28), generado por una cámara de flujo laminar, con secciones de aproximadamente 5 mm² de los diferentes hongos de prueba (Figura N° 29). Los envases permanecieron cerrados y sellados con parafilm con el objetivo de evitar la contaminación del ensayo y mantener las condiciones

de desarrollo de los hongos. Luego, fueron dispuestos en un ambiente sin luz durante 3 semanas, a una temperatura de 25 °C y una humedad relativa del 65% (Figura N° 30).



Figura N° 25. Botella Cultivo con Arena



Figura N° 26. Botella con Sustrato Alimenticio



Figura N° 27. Esterilización Botellas de Cultivo

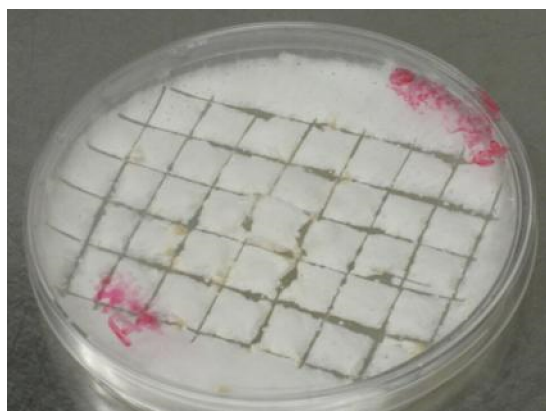


Figura N° 28. Secciones para Inoculación



Figura N° 29. Inoculación Sustrato Alimenticio



Figura N° 30. Incubación de Cepas

Posteriormente, las probetas (14 x 14 x 14 mm) de pino ponderosa fueron ubicadas en los envases en un ambiente aséptico, previo acondicionarlas al 12% de

contenido de humedad (HR=64,2%; TBS=21 °C; TBH=14 °C), esterilizarlas en autoclave por 20 minutos (121 °C; 1,2 atmosferas), y pesarlas (T1).

Finalizada la instalación del material, los envases fueron dispuestos en un ambiente a 25 °C y 65% de humedad relativa, por un periodo de 9 semanas para el hongo de pudrición café y de 17 semanas para el hongo de pudrición blanca.

Cumplido el periodo de ensayo, las probetas fueron retiradas de los envases, eliminado el micelio superficial y acondicionadas al 12% de humedad. Posteriormente fueron pesadas (T2).

Con el peso inicial (T1) y final (T2) de cada probeta se procedió a calcular el porcentaje de pérdida de peso (PP).

$$PP = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100$$

Los resultados fueron analizados estadísticamente con un análisis de varianza (ANOVA). Además, se asignó una categoría de durabilidad natural para albura y duramen basado en los indicadores de Findlay (1962) (Tabla N° 46) y ASTM D2017-1985 (Tabla N° 47). Cabe consignar que el estudio de Findlay emplea las mismas 5 categorías que señala la norma chilena NCh 789-1 Of.1987.

Tabla N° 46. Escala de Findlay

Indicador	Categoría				
	Muy durable	Durable	Moderadamente durable	Poco durable	No durable
Tiempo	25 años	15-25 años	10-15 años	5-10 años	5 años
Pérdida peso	0 - <1%	1% - <5%	5% - <10%	10% - <30%	>30%

Tabla N° 47. Escala ASTM D2017

Pérdida de peso (%)	Categoría
0 – 10	Altamente resistente
11 a 24	Resistente
25 a 44	Moderadamente resistente
+ 44	No resistente

Los equipos utilizados en el estudio corresponden a un autoclave, una cámara de flujo laminar y una balanza analítica con una capacidad de 210 gramos.

4.4. RESULTADOS

En la Tabla N° 48 se registra la pérdida de peso de la madera en función del tipo de hongo y madera ensayada.

Las mayores pérdidas de peso se registraron con los hongos de pudrición café GT y PP. El primero fue el más agresivo con la madera de albura (44,52%). Con la madera de duramen los 2 tipos de hongos presentan comportamientos semejantes.

Los hongos de pudrición blanca TV y PO presentan comportamientos similares en madera de albura y duramen, siendo levemente mayor la pérdida de peso que ocasiona el hongo TV

Tabla N° 48. Pérdida de Peso

Probeta	Pérdida de Peso según Tipo de Hongo (%)							
	GT		PP		TV		PO	
	Albura	Duramen	Albura	Duramen	Albura	Duramen	Albura	Duramen
1	40,35	34,22	39,40	34,23	18,99	9,26	16,31	8,37
2	41,92	32,03	49,42	34,00	19,07	8,41	13,00	8,76
3	42,38	33,15	36,37	32,37	18,92	8,67	14,68	8,60
4	46,23	37,39	37,16	24,61	19,21	9,88	14,44	9,11
5	40,84	30,37	40,43	32,08	18,61	9,40	16,07	8,71
6	49,44	31,03	34,83	26,60	19,92	10,22	11,53	8,82
7	40,16	32,33	33,78	33,55	16,72	8,94	13,08	8,21
8	47,66	31,52	38,19	29,59	19,50	8,96	15,73	8,17
9	46,68	33,90	32,28	32,26	17,80	9,16	14,59	8,81
10	51,61	33,77	30,15	34,80	19,44	9,87	16,28	9,19
11	46,18	35,14	34,18	31,11	19,30	9,20	12,66	8,84
12	46,28	31,97	35,14	34,91	19,26	8,38	16,09	8,41
13	43,50	32,38	34,18	35,79	19,93	9,43	16,28	9,25
14	40,43	31,98	34,24	25,82	17,56	9,21	14,14	8,59
15	48,40	32,89	40,67	33,31	18,63	8,63	18,66	9,45
16	42,36	33,02	32,65	30,54	18,30	8,58	13,19	8,90
17	37,88	31,50	40,19	30,06	20,23	10,23	10,08	8,94
18	42,37	36,08	46,05	20,89	19,64	9,45	15,58	8,68
19	52,47	31,65	42,15	30,54	19,43	9,48	13,31	8,57
20	43,36	34,03	34,27	24,09	20,78	10,40	11,01	8,70
Promedio	44,52 (0,040)	33,02 (0,018)	37,29% (0,048)	30,56 (0,041)	19,06 (0,009)	9,29 (0,006)	14,34 (0,021)	8,75 (0,003)

() Desviación estándar

El comportamiento de los hongos de pudrición café y blanca se justifica por la naturaleza de cada uno de ellos. La pudrición café se aloja generalmente en especies coníferas, destruyendo la celulosa y hemicelulosa. Los hongos de pudrición blanca, en cambio, atacan principalmente la madera de latifoliadas, destruyendo la lignina (Haque 1997; University of Illinois 1999; Kim & Singh 2000).

La evolución de los hongos de pudrición café fue rápida. Al cabo de 2 semanas las probetas de albura fueron cubiertas casi en su totalidad con micelio del hongo GT. El duramen atacado por el mismo hongo fue cubierto completamente con micelio entre las 4 y 8 semanas. En el caso del hongo PP, el desarrollo fue más lento, tanto en albura como duramen, desarrollándose el micelio a partir de la cuarta semana. Al cabo de 8 semanas las probetas fueron cubiertas en su totalidad.

En el caso de los hongos de pudrición blanca, el comportamiento más agresivo se observó con el hongo TV. Transcurridas 8 semanas el duramen fue cubierto por una fina capa de micelio, incrementándose levemente hasta la semana 16. El hongo PO, en tanto, al cabo de 8 semanas cubrió con una fina capa de micelio la albura, permaneciendo en la

misma condición hasta la semana 16. El desarrollo del hongo en el duramen fue más lento, registrando una cobertura similar que en la albura transcurridas 16 semanas.

Los datos fueron procesados utilizando el software estadístico Design Expert 8, efectuando un análisis de varianza con un nivel de confiabilidad del 95%. Se efectuó una prueba de normalidad a cada interacción de las variables estudiadas mediante el método de Kolmogorov-Smirnov, mostrando que los datos siguen distribuciones normales (Figuras N° 31 a N° 38).

En la Tabla N° 49 se resume el análisis de varianza efectuado a los datos transformados.

Tabla N° 49. Análisis de Varianza con Distribución Log-Normal

Origen	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de los Cuadrados	Valor F	Valor P
Tratamientos	56,330	7	8,047	813,779	< 0,0001
A-Madera	7,229	1	7,229	731,021	< 0,0001
B-Tipo Hongo	47,532	3	15,844	1602,255	< 0,0001
AB-Interacción	1,569	3	0,523	52,889	< 0,0001
Error	1,50	152	9,889e-03	--	--
Total	57,83	159	--	--	--

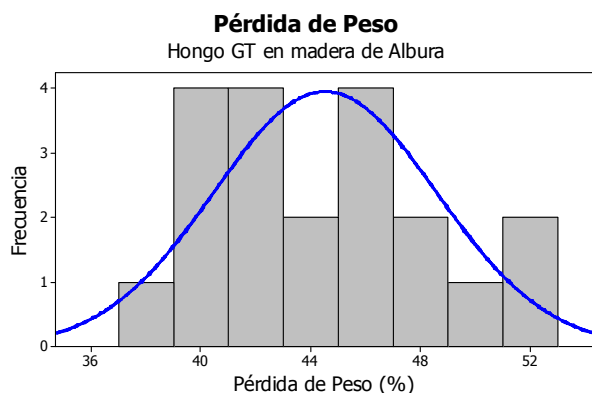


Figura N° 31. Distribución Normal GT en Albura

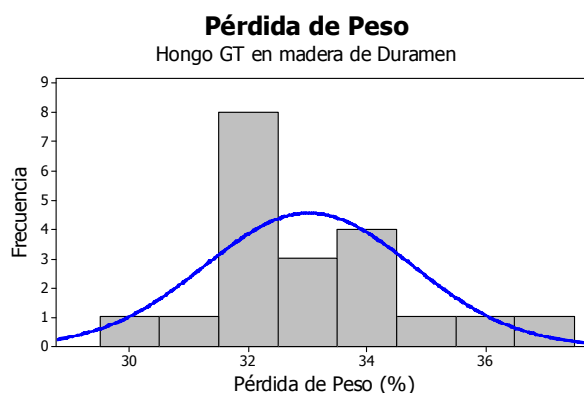


Figura N° 32. Distribución Normal GT en Duramen

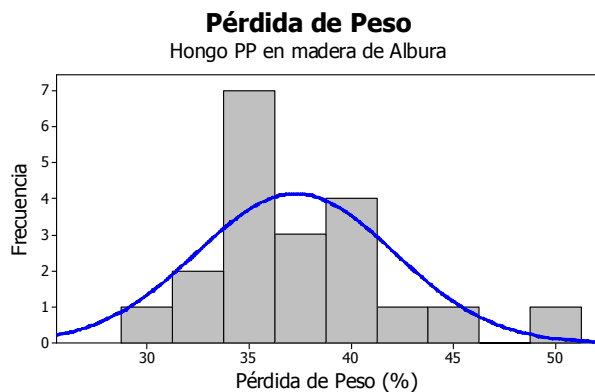


Figura N° 33. Distribución Normal PP en Albura

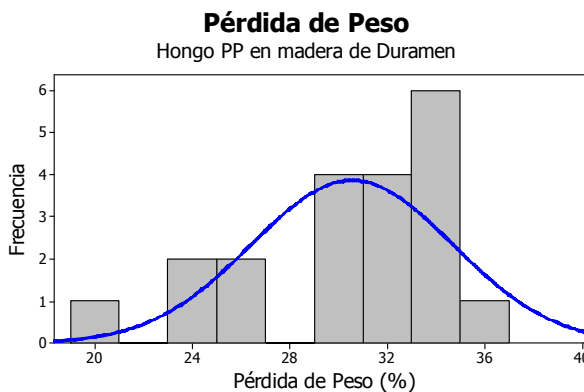


Figura N° 34. Distribución Normal PP en Duramen

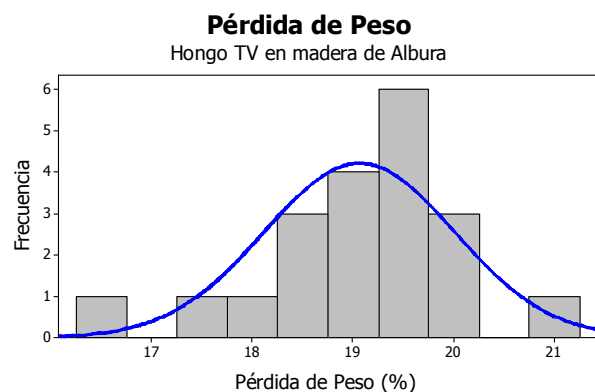


Figura N° 35. Distribución Normal TV en Albura

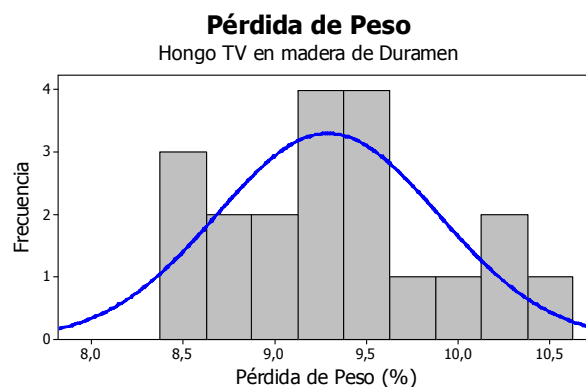


Figura N° 36. Distribución Normal TV en Duramen

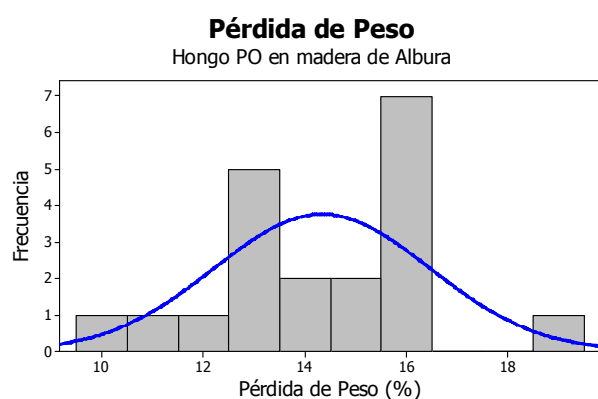


Figura N° 37. Distribución Normal PO en Albura

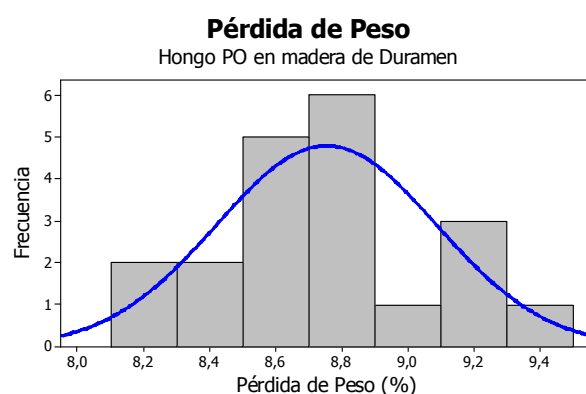


Figura N° 38. Distribución Normal PO en Duramen

Para el nivel de significancia elegido se comprobó que tanto la madera (albura y duramen), el tipo de hongo (pudrición café y blanca) y la interacción de las variables mencionadas son significativas sobre la pérdida de peso, dado que el valor P es inferior a 0,05. La figura N° 39 ilustra los resultados obtenidos.

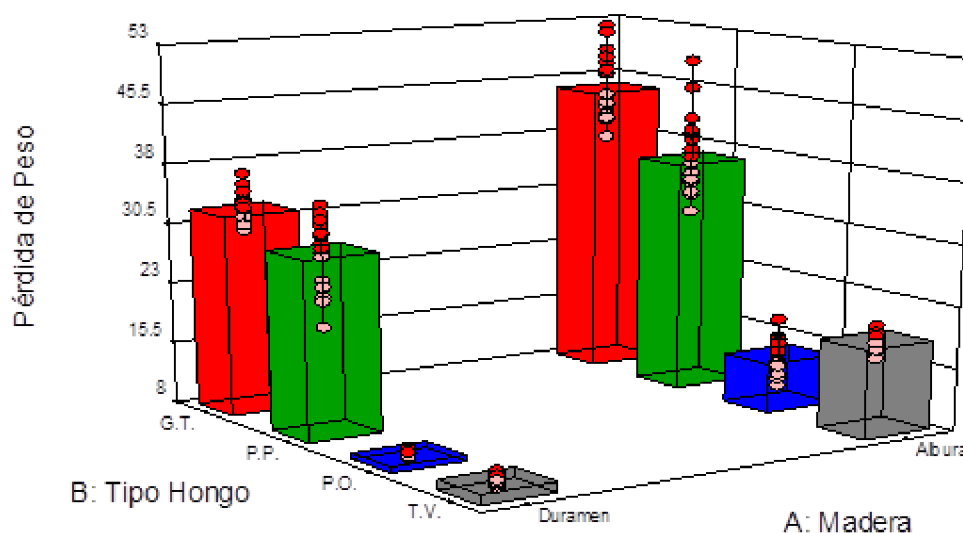


Figura N° 39. Pérdida de Peso en Probetas de Pino Ponderosa

En la Tabla N° 50 se asigna un grado de durabilidad natural a la madera de albura y duramen de pino ponderosa bajo tres alternativas de clasificación.

Bajo la clasificación de Findlay, la albura y duramen califican como "no durable" a los hongos de pudrición café. Respecto de la pudrición blanca, la albura y duramen califican como "poco durable" y "moderadamente durable", respectivamente.

Al utilizar la clasificación de ASTM, la albura sometida a los hongos de pudrición café, dependiendo del tipo de hongo, califica como "no resistente" y "moderadamente resistente". El duramen, en tanto, califica como "moderadamente resistente". La albura y duramen expuestos a hongos de pudrición blanca califican como "resistente" y "altamente resistente", respectivamente.

La norma chilena es aplicable solo a madera de duramen. En esta condición, el pino ponderosa atacado por los hongos de pudrición café califica como "no durable". Expuesto a los hongos de pudrición blanca califica como "moderadamente durable".

La literatura internacional define la durabilidad natural del pino ponderosa en base a las categorías de la norma ASTM D2017. La albura califica como "no resistente" (Eslyn y Terry, 1976; Terry, 1978; Canadian Wood Council, s/f) y el duramen como "moderadamente resistente" y "no resistente" (USDA Forest Service, 1987; Alden 1997; BS5589, 1989; Sheffer y Morrell, 1998).

Según la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), cuerpo normativo que regula la construcción en el país, cuando la durabilidad natural de una madera, determinada según NCh 789/1, califica como "no durable", ella deberá ser preservada conforme a NCh819 para ser utilizada como elemento estructural. De acuerdo a lo anterior, y considerando que la durabilidad natural del duramen de pino ponderosa califica como "no durable" ante la acción de los hongos de pudrición café, su uso en aplicaciones estructurales debe considerar una impregnación previa.

Tabla N° 50. Clasificación de la Durabilidad Natural

Madera	Tipo de hongo	Nombre del hongo	Clasificación de la Durabilidad Natural			
			Findlay (1962)		ASTM 2017 (1985)	NCh 789/1 (1987) *
			Categoría	Tiempo		
Albura	Pudrición café	GT	No durable	5 años	No Resistente	N/A
		PP	No durable	5 años	Moderadamente Resistente	N/A
	Pudrición blanca	TV	Poco durable	5 - 10 años	Resistente	N/A
		PO	Poco durable	5 - 10 años	Resistente	N/A
Duramen	Pudrición café	GT	No durable	5 años	Moderadamente Resistente	No durable
		PP	No durable	5 años	Moderadamente Resistente	No durable
	Pudrición blanca	TV	Moderadamente durable	10 - 15 años	Altamente Resistente	Moderadamente durable
		PO	Moderadamente durable	10 - 15 años	Altamente Resistente	Moderadamente durable

* Sólo para madera de duramen. Basado en las categorías determinadas por Findlay

N/A : No aplica

4.5. CONCLUSIONES

La escala de pérdida de peso de Findlay es más amplia y rigurosa que ASTM D2017-1985.

Los hongos de pudrición café fueron los más agresivos, destacando el GT.

Comparativamente, la durabilidad natural de estudios internacionales coincide con las categorías determinadas para la albura y duramen del pino ponderosa que crece en el país. Cuando las maderas de albura y duramen son expuestas a la pudrición café, se definen como “no resistente” y “moderadamente resistente” respectivamente, según la clasificación ASTM.

De acuerdo con NCh789/1, el duramen de pino ponderosa califica como “no durable”, condición que obliga a impregnar la madera para aplicaciones estructurales.

4.6. REFERENCIAS

Alden, H. A., 1997. Softwood of North America. Forest Products Laboratory. Forest Service, USDA. GTR-102. 151 pp.

ASTM D2017, 1985. Standard Test Method of Accelerated Laboratory Test of Natural Decay Resistance of Woods. American Society for Testing and Materials.

AWPA E10, 2001. Testing Wood Preservatives by Laboratory Soil Block Cultures. American Wood Protection Association.

BS5589, 1989. Code of Practice for Preservation of Timber. British Standards Institution.

Canadian Wood Council, s/f. Natural durability of North American softwoods.

Eslyn, W. E. and Terry, H. L., 1976. Decay resistance and susceptibility of sapwood of fifteen tree species. Phytopathology 66:1010-1017.

Findlay, W. P. K., 1962. Preservation of Timber. A & C Black Publishers Ltd. 176 pp.

Haque, N., 1997. White Rot Fungal Decay of Wood. University of Wales. United Kingdom.

Kim, Y. S. and Singh, A. P., 2000. Micromorphological Characteristics of Wood Biodegradation in Wet Environments: A Review. IAWA Journal, Vol. 21 (2), 2000: 135–155.

NCh 789-1, 1987. Maderas - Parte 1: Clasificación de Maderas Comerciales por su Durabilidad Natural. Instituto Nacional de Normalización. Santiago. Chile.

NCh 819. 2009. Madera Preservada - Pino Radiata - Clasificación según Uso y Riesgo en Servicio y Muestreo. Instituto Nacional de Normalización. Santiago. Chile.

Scheffer, T. C. and Morrel, J. J., 1998. Natural Durability of Wood: A Worldwide Checklist of Species. College of Forestry. Forest Research Laboratory. Oregon State University. United States.

Terry, H. L., 1978. How Moisture and Pit Aspiration Affect Decay of Wood by White-Rot and Brown-Rot Fungi. Materials and Organisms, Vol.13 N°3. Verlag Duncker & Humblot. 9 pp.

University of Illinois, 1999. Report on Plant Disease. RPD N°642. Department of Crop Sciences. University of Illinois. United States.

USDA Forest Service, 1987. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Agricultural Handbook No. 72. United States Department of Agriculture.

CAPÍTULO V. IMPREGNACIÓN

Patricio A. Elgueta, INFOR, y Gonzalo J. Hernández, INFOR.

La impregnación consiste en incorporar a la madera productos químicos que la protegen del ataque de agentes biológicos, prolongando de esta manera su vida útil.

Existen distintos métodos de impregnación y tipos de productos químicos para este propósito. La utilización de ellos dependerá de las características de la madera y del nivel de riesgo de deterioro esperado.

5.1. OBJETIVO GENERAL

Probar a nivel de laboratorio un programa vacío y presión que permita impregnar madera de pino ponderosa utilizando una solución en base a CCA-C, considerando un nivel de riesgo de deterioro R3, equivalente a una retención de 4 kg óx./m³.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Evaluar la impregnación de madera de albura y duramen, considerando parámetros de calidad de retención y penetración utilizados con el Pino radiata.

Cuantificar el nivel de absorción de la solución CCA-C para los distintos tipos de madera evaluadas.

5.3. MATERIAL Y MÉTODO

Se procesaron 75 probetas de pino ponderosa en escuadrías 0,02 x 0,02 x 0,2 m; 30 de albura y 45 de duramen, las que fueron diferenciadas mediante cloruro férrico.

El equipo utilizado consideró un autoclave de 0,34 m de diámetro y 0,52 m de largo, con una capacidad de 0,047 m³; un estanque de almacenamiento de 0,34 m de diámetro y 0,91 m de largo, con una capacidad de 0,083 m³, y un estanque de presión con bomba manual de 0,25 x 0,25 x 0,22 m, con una capacidad de 0,014 m³ (Figura N° 40).

Se trabajó con un programa para pino radiata, buscando una retención objetivo de 4,0 kg óx./m³, de acuerdo a lo establecido por los niveles de riesgo R1, R2 y R3 de la norma chilena NCh819.Of2009, para sal CCA-C al 60% de concentración (Tabla N° 51).

Tabla N° 51. Variables del Programa de Impregnación

Etapas	Presión	Tiempo (min)
Vacío inicial	-25" Hg	15
Presión	200 psi	30
Vacío final	-25". Hg	15



Figura N° 40. Planta Impregnadora Piloto

El programa de ensayos consistió en un total de 4 cargas, impregnando 15 probetas ($0,0012 \text{ m}^3$) de albura y 15 probetas de duramen, ya sea en conjunto o por separado. Se utilizaron contrapesos metálicos sobre las probetas para evitar flotación. Por cada ensayo se generó una hoja de carga con las especificaciones de las probetas, los tiempos, las presiones de proceso y los detalles del tratamiento.

La retención, concentración y penetración de la solución fueron determinadas por un laboratorio externo, efectuando 3 mediciones para madera de albura y duramen, de acuerdo a lo estipulado en la norma NCh 763/1 Of.1996.

Para determinar la retención de cada probeta se extrajeron tarugos con un taladro de incremento manual de 5 mm de diámetro, los que fueron tamizados hasta juntar aproximadamente 1 g de aserrín. La muestra fue secada en horno por 48 horas, para posteriormente determinar los porcentajes de cada componente de la solución CCA. De acuerdo a los resultados de retención informados por el laboratorio, se modificó la concentración de la solución CCA para alcanzar el valor requerido por norma. Para estas determinaciones se utilizó un equipo de espectroscopía de fluorescencia de rayos X, marca Oxford Lab X.

La penetración se determinó sobre los tarugos previo al tamizado. Se utilizó el compuesto químico cromo azurol, tiñendo de color azul la madera impregnada ante la presencia de cobre. De acuerdo a la norma NCh 819 Of.2009 la penetración requerida para madera de albura debe ser del 100% de la sección transversal, mientras que para madera de duramen el mínimo es de 3 mm desde la superficie.

La absorción se determinó por diferencia de pesos. Previo al inicio del proceso, se determinó el contenido de humedad y el peso de las probetas. Finalizada la impregnación, se dejó escurrir las probetas, eliminando el remanente superficial de solución CCA. Posteriormente, las probetas fueron pesadas nuevamente. Al efectuar la diferencia de peso se obtuvo la absorción de cada probeta tratada.

5.4. RESULTADOS

En la Tabla N° 52 se muestran los resultados de las 4 cargas evaluadas, con incrementos graduales en la concentración, dependiendo de los resultados obtenidos, comenzando con un valor cercano al 1%.

La carga N°1, que consideró exclusivamente probetas de albura, obtuvo una retención promedio de 2,86 kg óx/m³, valor inferior a lo establecido por norma, sin embargo, cumple con el 100% de penetración. La carga N°2, que consideró probetas de albura y duramen, permitió a la albura alcanzar el valor objetivo de retención y penetración, con un promedio de 4,48 kg óx./m³ y 100%, respectivamente.

Las retenciones en madera de duramen, con concentraciones de 1,31% y 1,6%, fueron similares, obteniendo un promedio de 2,14 y 2,32 kg óx/m³, respectivamente. Las 2 cargas no cumplieron el requisito de retención, si lo hicieron con la penetración.

Al incrementar la concentración a un 3,0%, la madera de duramen alcanzó una retención y penetración promedio de 5,10 kg óx/m³ y 100%, respectivamente, cumpliendo con las exigencias de la norma NCh 819 Of.2009.

Los resultados señalan que el duramen es difícil de impregnar, misma conclusión determinada por el Canadian Wood Council (CWC), clasificando la tratabilidad del duramen de pino ponderosa como "Impermeable".

Tabla N° 52. Resultados de Retenciones y Penetraciones

Carga (N°)	Concentración Solución (%)	Albura		Duramen		Cumple Norma NCh 819
		Retención (kg óx/m ³)	Penetración (%)	Retención (kg óx/m ³)	Penetración (%)	
1	0,99	2,89	100	--	--	No
		2,75	100	--	--	No
		2,95	100	--	--	No
2	1,31	4,03	100	2,22	90	Sólo Albura
		4,55	100	2,17	100	Sólo Albura
		4,87	100	2,03	100	Sólo Albura
3	1,6	--	--	2,42	100	No
		--	--	2,15	100	No
		--	--	2,40	100	No
4	3	--	--	4,19	100	Si
		--	--	4,92	100	Si
		--	--	6,18	100	Si

En la Tabla N° 53 se indican las absorciones de solución CCA-C obtenidas por cada tratamiento.

Las cargas de albura y duramen que cumplieron los requisitos de penetración y retención registraron una absorción de 725 L/m³ y 283,3 L/m³, respectivamente.

Tabla N° 53. Absorciones

Carga (N°)	Madera	C.H. (%)	Litros Absorbidos (L)	Absorción (L/m³)
1	Albura	10,1	0,63	525
2	Albura	9,8	0,87	725
	Duramen	10,7	0,42	350
3	Duramen	10,2	0,41	341,7
4	Duramen	9,5	0,34	283,3

5.5. CONCLUSIONES

La madera de albura de pino ponderosa se deja impregnar con facilidad. Se recomienda utilizar una concentración de 1,31%, con vacíos iniciales y finales de -25" Hg por 15 minutos y una presión de 200 psi por 30 minutos.

La madera de duramen de pino ponderosa es más difícil de tratar que la albura, por lo que se recomienda utilizar una concentración entre 2,0% y 2,5%.

Las cargas con madera de albura y duramen que cumplieron los requisitos de calidad de la norma NCh 819 absorbieron 725 y 283 L/m³, respectivamente. En ambos casos el contenido de humedad de la madera fue cercano al 10%.

5.6. REFERENCIAS

CWC, 2013. Canadian Wood Council. En: <http://www.cwc.ca/index.php/en/design-with-wood/durability/pressure-treated-wood/treatability>

NCh 763/1Of.1996. Maderas - Preservación - Parte 1: Análisis de Madera Preservada y Soluciones Preservantes Mediante Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X. Instituto Nacional de Normalización. Santiago. Chile.

NCh 819/1Of.2009. Madera Preservada - Pino Radiata - Clasificación según Uso y Riesgo en Servicio y Muestreo. Instituto Nacional de Normalización. Santiago. Chile.

CAPÍTULO VI. CURVADO DE MADERA SÓLIDA VAPORIZADA

Patricio A. Elgueta, INFOR, Gonzalo J. Hernández, INFOR y
Victor F. Sagner, Maderas Curvadas.

Los elementos de madera curvos están presentes en una infinidad de productos, tales como sillas, mesas, juguetes y elementos decorativos.

Existen distintas técnicas que permiten generar elementos de madera curvos, siendo el curvado mecánico de la madera vaporizada el que arroja los mayores beneficios técnicos y económicos.

6.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la aptitud al curvado mecánico de la madera aserrada vaporizada de pino ponderosa de la Región de Aysén.

6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Evaluar la calidad del curvado de madera sólida con vapor, bajo distintos parámetros de proceso.

Identificar los parámetros de ensayo que minimizan la aparición de defectos (grietas, pliegues) en la madera curvada.

6.3. MATERIAL Y MÉTODO

En la Tabla N° 54 se resume las variables, niveles y magnitudes utilizadas en el estudio.

Tabla N° 54. Variables de Proceso

Variable	Niveles	Unidad	Magnitudes
Espesor de la madera	3	mm	13, 16, 23
Presión de vapor	2	mBar	20, 100
Tiempo de vaporizado	2	min/mm	1, 3
Radio de curvatura	2	mm	90, 230
Repeticiones	5		

El material experimental, conformado por 120 probetas de 45 mm de ancho y largo en función del radio de curvatura, fue elaborado en el Centro de Formación Técnica Lota Arauco; considerando caras cepilladas, veta recta, sin presencia de nudos ni otros defectos visibles y un contenido de humedad inferior al 25%.

Se utilizó un vaporizador GHE Bavaria, con una capacidad de 0,23 m³ y una presión de operación máxima de 600 mBar (Figura N° 41); y una curvadora hidráulica asimétrica RYE, con una mesa de trabajo de 2 m de largo (Figura N° 42) (Instituto Forestal, 2009).



Figura N° 41. Vaporizador GHE Bavaria



Figura N° 42. Curvadora Asimétrica RYE

Los ensayos se ejecutaron siguiendo la secuencia indicada en la Tabla N° 55.

Tabla N° 55. Vaporizado de la Madera

Secuencia de Carga	Piezas por Carga (N°)	Radio de Curvatura (mm)	Espesor (mm)	Vaporizado	
				Presión (mBar)	Tiempo (min)
1	10	230	13	20	13
					39
2	20	230	16	20	16
					48
			23	20	23
					69
3	10	230	13	100	13
			16	100	16
4	20	230	13	100	39
			16	100	48
			23	100	23
					69
5	30	90	13	20	13
			16	20	16
			23	20	23
			13	20	39
			16	20	48
			23	20	69
6	30	90	13	100	13
			16	100	16
			23	100	23
			13	100	39
			16	100	49
			23	100	69

Las probetas vaporizadas fueron dispuestas en un molde metálico, que limita la formación de esfuerzos de tracción que resultan inapropiados para el proceso de curvado, y curvadas y mantenidas en esa condición durante 1 minuto (Figura N° 43).

Posteriormente, las probetas se enfriaron en condición ambiente en el mismo molde metálico (Figura N° 44) y se estabilizaron por 5 días en una plantilla de reposo que mantiene la forma curvada (Figura N° 45).



Figura N° 43. Curvado



Figura N° 44. Enfriado



Figura N° 45. Reposo

Para cada pieza curvada se determinó el contenido de humedad final (de acuerdo a NCh 2827) y se midió la profundidad de la grieta y pliegue de mayor magnitud, parámetro que permitió asignar grados de calidad a cada probeta ensayada (Tabla N° 56).

Tabla N° 56. Escala de Calidad para Pliegues y Grietas

Grado	Calidad	Rango (mm)	
		Pliegues	Grietas
G1	Excelente	0,0	0,0
G2	Muy buena	$> 0,0 \leq 0,4$	$> 0,0 \leq 0,5$
G3	Buena	$> 0,4 \leq 1,0$	$> 0,5 \leq 1,0$
G4	Regular	$> 1,0 \leq 3,0$	$> 1,0 \leq 2,0$
G5	Mala	$> 3,0$	$> 2,0$

Con el objetivo de establecer un indicador de calidad, en cada variable estudiada, se asignó un valor numérico a los distintos grados de calidad, siendo 7 para G1 y 3 para G5. El valor promedio de los valores ponderados en pliegues y grietas representa la calidad obtenida.

6.4. RESULTADOS

En las Figuras N° 46 y N° 47 se grafican los distintos grados de calidad para pliegues y grietas respectivamente.



Figura N° 46. Grados de Calidad para Pliegues



Figura N° 47. Grados de Calidad para Grietas

En la Tabla N° 57 se resume la evaluación de calidad de las probetas ensayadas.

Tabla N° 57. Evaluación de la Calidad del Curvado

RC (mm)	Espesor (mm)	Presión (mBar)	T V (min/mm)	Piezas con Pliegues					Piezas con Grietas					PL	GR	Promedio
				G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5			
90	13	20	1	0	0	2	2	1	4	1	0	0	0	4,2	6,8	5,5
			3	0	0	0	4	1	4	0	0	1	0	3,8	6,4	5,1
		100	1	0	2	1	1	1	4	1	0	0	0	4,8	6,8	5,8
			3	0	0	1	3	1	4	1	0	0	0	4	6,8	5,4
	16	20	1	0	0	0	5	0	1	4	0	0	0	4	6,2	5,1
			3	0	0	0	1	4	1	2	2	0	0	3,2	5,8	4,5
		100	1	0	1	0	4	0	3	2	0	0	0	4,4	6,6	5,5
			3	0	1	0	3	1	3	2	0	0	0	4,2	6,6	5,4
	23	20	1	0	0	0	0	5	0	4	1	0	0	3	5,8	4,4
			3	0	0	0	0	5	3	1	0	1	0	3	6,2	4,6
		100	1	0	0	1	1	3	2	2	1	0	0	3,6	6,2	4,9
			3	0	0	0	0	5	1	2	0	0	1	3	4,4	3,7
230	13	20	1	0	1	4	0	0	5	0	0	0	0	5,2	7	6,1
			3	1	3	1	0	0	5	0	0	0	0	6	7	6,5
		100	1	0	2	3	0	0	5	0	0	0	0	5,4	7	6,2
			3	0	1	3	1	0	4	0	0	0	1	5	6,2	5,6
	16	20	1	0	0	3	2	0	5	0	0	0	0	4,6	7	5,8
			3	0	1	3	1	0	5	0	0	0	0	5	7	6
		100	1	0	1	3	1	0	5	0	0	0	0	5	7	6
			3	0	1	3	1	0	5	0	0	0	0	5	7	6
	23	20	1	0	0	1	4	0	5	0	0	0	0	4,2	7	5,6
			3	0	0	3	2	0	5	0	0	0	0	4,6	7	5,8
		100	1	0	0	2	3	0	5	0	0	0	0	4,4	7	5,7
			3	0	1	3	1	0	5	0	0	0	0	5	7	6

RC: Radio de Curvatura TV: Tiempo de Vaporizado PL: Pliegues GR: Grietas

Las Figuras N° 48 y N° 49, para tiempos de vaporizado de 1 y 3 min/mm, respectivamente, relacionan la razón “radio de curvatura / espesor” con los indicadores de calidad de pliegues y grietas en la madera. Ninguna figura consideró la influencia de la variable presión de vapor.

Las Figuras N° 50 y N° 51, para presiones de vapor de 20 y 100 mBar respectivamente, relacionan la razón “radio de curvatura / espesor” con los indicadores de calidad de pliegues y grietas en la madera. Ninguna figura considera la influencia de la variable tiempo de vaporizado.

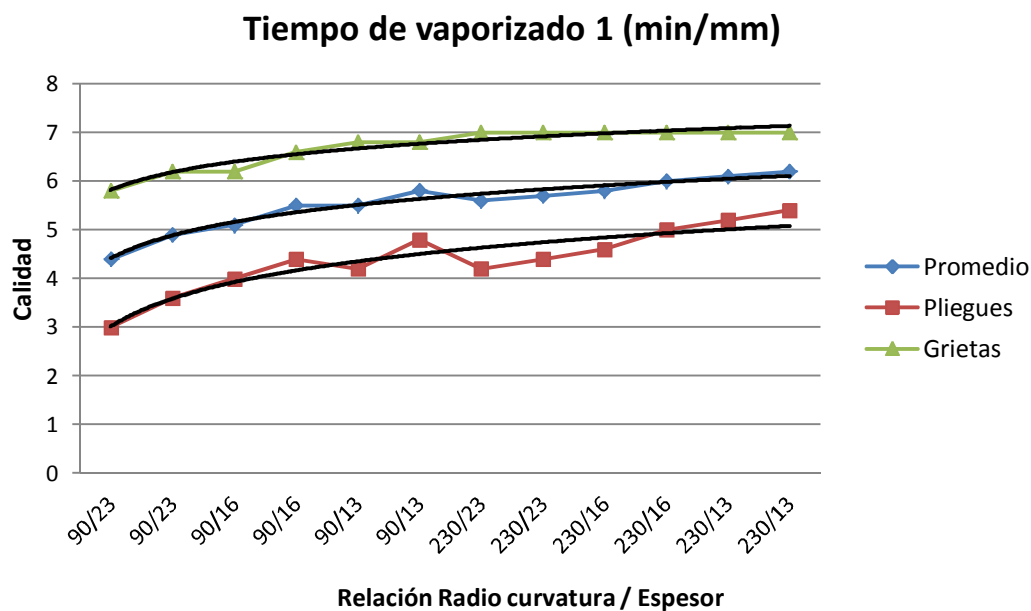


Figura N° 48. Tendencia de Calidad. Tiempo de Vaporizado (1 mm/min)

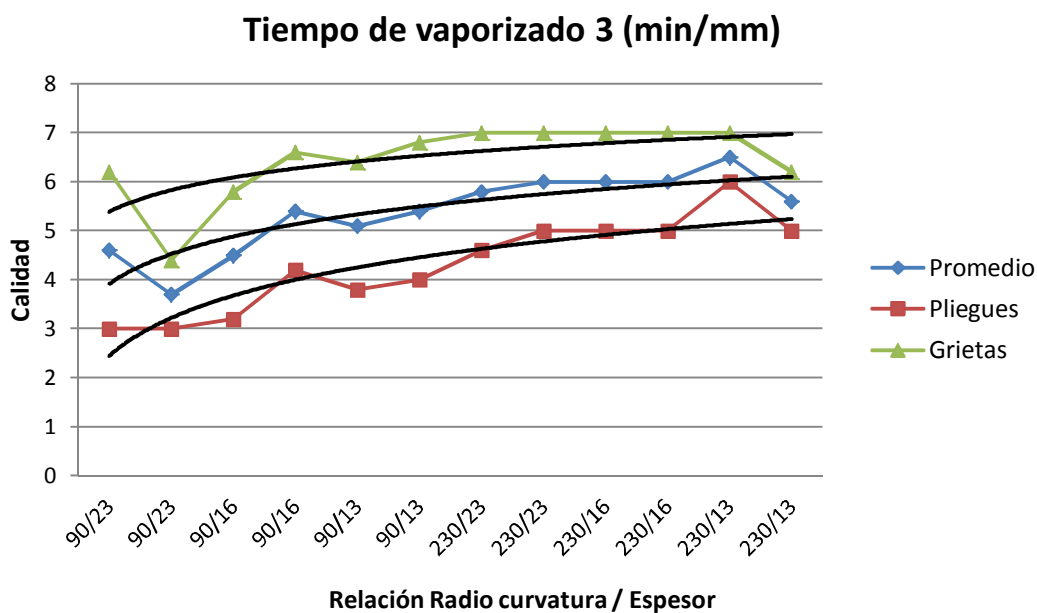


Figura N° 49. Tendencia de Calidad. Tiempo de Vaporizado 3 (min/mm)

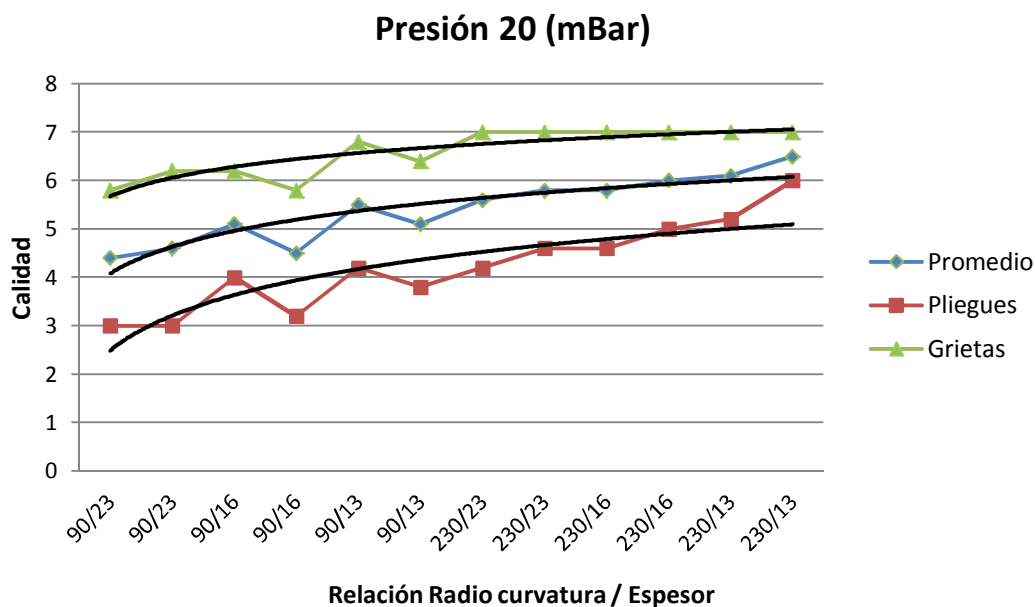


Figura N° 50. Tendencia de Calidad. Presión de 20 (mBar)

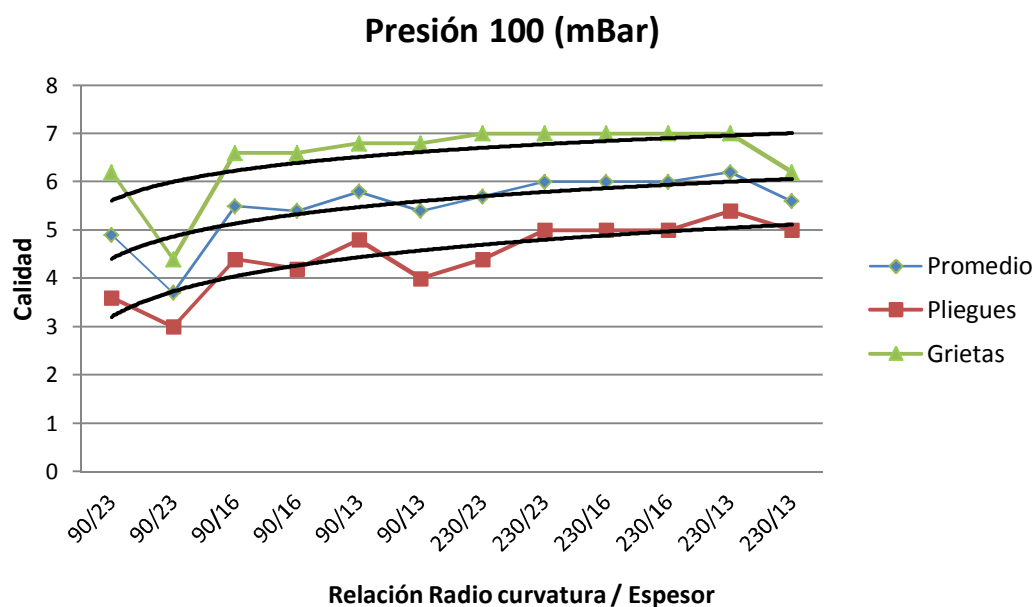


Figura N° 51. Tendencia de Calidad. Presión de 100 (mBar)

En las cuatro figuras se observa la misma tendencia, a mayor razón “radio de curvatura / espesor”, mejor es la calidad de la madera. En otras palabras, el curvado de madera de bajo espesor en moldes con radios de curvatura mayor genera las mejores calidades de la madera vaporizada.

Para radios de curvatura 90 y 230 mm, espesores 13, 16 y 23 mm; las combinaciones de variables que entrega los mejores resultados son a las siguientes:

- 90 mm: Espesor 13 mm, presión 100 mBar y tiempo de vaporizado 1 min/min.
- 230 mm: Espesor 13 mm, presión 20 mBar y tiempo de vaporizado 3 min/mm.

Respecto de los pliegues, para el radio de curvatura 90 mm, las piezas se agrupan en las calidades G4 y G5, con un 40% y 45% respectivamente. Para el radio de curvatura 230 mm, la mayor cantidad de piezas se agrupa bajo la calidad G3, con un 53,33%, seguido por la calidad G4 con un 26,67%.

En el caso de las grietas, para los 2 radios de curvatura estudiados, hay una clara tendencia hacia la calidad G1, con un 50,85% para 90 mm y un 98,33% para 230 mm. Una de las piezas con radio de curvatura 90 mm sufrió una fractura en la plantilla de reposo, por lo que no fue considerada en el análisis.

En las Tablas N° 58 y N° 59 se resume la profundidad de pliegues y la grietas generadas en las probetas ensayadas, radios de curvatura 90 mm y 230 mm, respectivamente.

Para el radio de curvatura 90 mm, las grietas poseen una profundidad promedio de 0,17 mm. El valor más elevado se registra en el espesor 23 mm; los contenidos de humedad finales variaron entre un 6,77% y 8,35%.

Para el radio de curvatura 230 mm, sólo se generaron grietas en una pieza de espesor 13 mm. La profundidad promedio registrada fue de 0,06 mm, mientras que los contenidos de humedad finales fluctuaron entre un 7,07% y un 9,04%.

**Tabla N° 58. Registro de Pliegues, Grietas y Contenido de Humedad
Radio Curvatura 90 mm**

Propiedad	General		13 mm		16 mm		23 mm	
	Prom.	DE	Prom.	DE	Prom.	DE	Prom.	DE
Profundidad de pliegue	3,86	3,47	1,53	0,96	2,18	1,56	7,76	3,02
Profundidad de grieta	0,17	0,42	0,09	0,34	0,11	0,17	0,32	0,61
Contenido de humedad	7,37	1,17	6,77	0,39	7,01	0,36	8,35	1,56

DE: Desviación Estándar

**Tabla N° 59. Registro de Pliegues, Grietas y Contenido de Humedad
Radio curvatura 230 mm**

Propiedad	General		13 mm		16 mm		23 mm	
	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.	Prom.	D.E.
Profundidad de pliegue	0,83	0,49	0,61	0,36	0,85	0,53	1,04	0,48
Profundidad de grieta	0,06	0,50	0,19	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Contenido de humedad	7,95	1,04	7,07	0,47	7,76	0,56	9,04	0,84

DE: Desviación Estándar

6.5. CONCLUSIONES

Se determinó la curvabilidad a una partida de madera de pino ponderosa, utilizando 3 espesores, 2 radios de curvatura, 2 presiones de vapor y 2 tiempos de vaporizado (en función del espesor de la madera).

La madera aserrada vaporizada de pino ponderosa se deja curvar sin dificultad bajo distintas condiciones de operación. Los mejores resultados se obtienen con el radio de curvatura de 230 mm, espesor madera de 13 mm.

El factor predominante en la calidad del curvado de pino ponderosa es la relación "radio de curvatura - espesor". A mayor radio de curvatura y menor espesor de la pieza de madera, disminuye la presencia de grietas y pliegues.

6.6. REFERENCIAS

Instituto Forestal, 2009. Curvado industrial de madera sólida con vapor, una técnica que incorpora valor agregado a la pequeña y mediana industria del mueble. Proyecto del Fondo de Innovación Tecnológica de la Región del Bío-Bío. Proyecto 06-PC-S1-07.

NCh 2827, Of.2003. "Calibración y uso de xilohigrómetros portátiles". INN. Santiago, Chile.

SEDE DIAGUITAS

Km. 5, costado Aeródromo La Florida, La Serena
Fono / Fax (56-51) 543627

SEDE METROPOLITANA

Sucre 2397, Ñuñoa, Santiago
Fono: (56-2) 3667100. Fax: (56-2) 3667131

SEDE BIO BIO

Camino a Coronel km. 7,5, San Pedro de la Paz, Concepción
Fono / Fax: (56-41) 2853260

SEDE VALDIVIA

Fundo Teja Norte s/n, Valdivia
Fono: (56-63) 335200. Fax: (56-63) 218968

SEDE PATAGONIA

Camino Coyhaique Alto Km. 4,5, Coyhaique
Fono: (56-9) 8831860



INFOR

www.infor.cl