



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
Y CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MADERA
Y SUS BIOMATERIALES

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA DE MADERA DE *Pinus radiata* D.Don IMPREGNADA CON COBRE ALCALINO
CUATERNARIO (ACQ-D)

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero de la Madera

DANIEL IGNACIO MONTERO AREVALO

Profesor Guía: Sr. Alejandro Bozo G. Ingeniero Forestal,
Magíster en Ciencias Forestales, Universidad de Chile.
PhD en Ingeniería Civil, Washington State University, USA.

Santiago, Chile

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
Y CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MADERA
Y SUS BIOMATERIALES

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA DE MADERA DE *Pinus radiata* D.Don IMPREGNADA CON COBRE ALCALINO CUATERNARIO (ACQ-D)

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero de la Madera

DANIEL IGNACIO MONTERO AREVALO

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Alejandro Bozo G.	...7,0...
Prof. Consejero Sr. Ricardo Silva S.	...6,9...
Prof. Consejero Sr. Javier Gonzáles M.	...6,7...

Dedicado a mi padre Jorge M., a mi hermana Tania M., y en especial a mi madre
Carmen A., por su incondicional y constante apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer y dedicar esta memoria a Aldo Cisternas P. por su profunda e incondicional entrega y dedicación, para que este trabajo fuese llevado a cabo. Igualmente a Luís Frías (Q.E.P.D.) por sus consejos y constante apoyo en el desarrollo práctico/técnico de la misma.

A lo/s profesor/es, guía y consejeros, Alejandro Bozo G., Ricardo Silva S. y Misael Gutiérrez D., por su grata disposición, sus profesionales consejos, y acertados comentarios para la corrección y mejoramiento de la memoria.

A “Maderera El Pangué”, empresa ubicada en la ciudad de Santiago, dedicada a la fabricación y exportación de molduras, quien facilitó la madera para realización de este estudio.

A CHEMICAL SPECIALTIES INC (CSI) de EE.UU., quienes se interesaron en este proyecto, e hicieron la donación del preservante ACQ-D.

A mi amada madre, padre, hermana y amigos.

INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Preservante hidrosoluble Cobre Alcalino Cuaternario (ACQ)	1
1.2. Efecto del preservante, el proceso de preservación y post-tratamiento de secado sobre las propiedades mecánicas de la madera	2
1.2.1 Mecanismo de fijación del preservante en la madera.....	2
1.2.2. Efecto del proceso de preservación sobre las propiedades mecánicas.....	3
1.2.3. Efecto de la temperatura de secado sobre las propiedades mecánicas.....	3
1.3. Objetivos	3
2.1. Objetivos generales.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Descripción de las propiedades mecánicas	4
1.4.1. Flexión estática.....	4
1.4.2. Módulo de elasticidad (MOE).....	4
1.4.3. Módulo de Ruptura (MOR).....	5
1.4.4. Trabajo a máxima carga (WML).....	5
2. MATERIAL Y MÉTODO	7
2.1. Material	7
2.1.1. Material en estudio	7
2.1.2. Equipos utilizados para la impregnación de la madera	7
2.1.2.1. Cilindro de impregnación.....	7
2.1.2.2. Bomba de Vacío.....	7
2.1.2.3. Equipo utilizado para el secado de la madera.....	7
2.1.2.4. Máquina utilizada para la medición de las propiedades mecánicas.....	8
2.1.2.5. Otros elementos utilizados.....	8
2.2. Metodología	8
2.2.1. Preparación de la madera	8
2.2.1.1. Selección y dimensionado de la madera.....	8
2.2.1.2. Determinación de la albura y el duramen.....	8
2.2.1.3. Determinación de la densidad.....	9

2.2.1.4. Formación de grupos de densidad homogénea.....	9
2.2.2.- Impregnación de las probetas.....	10
2.2.2.1. Distribución de los grupos para impregnar.....	10
2.2.2.2. Preparación de las sal preservante.....	10
2.2.2.3. Impregnación de la madera.....	12
2.2.2.4. Determinación de la absorción en las probetas.....	12
2.2.3. Secado de la madera.....	13
2.2.3.1. Tipos de secado aplicados.....	13
2.2.3.2. Distribución de los grupos para secado.....	13
2.2.3.3. Secado convencional.....	13
2.2.3.4. Secado a temperatura ambiente.....	14
2.2.4. Determinación de propiedades mecánicas.....	14
2.2.4.1. Preparación de las probetas.....	14
2.2.4.2. Número mínimo de observaciones.....	15
2.2.5. Análisis estadístico de los resultados.....	15
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
3.1. Modulo de elasticidad (MOE).....	17
3.1.1. Efecto del tipo de secado sobre MOE.....	17
3.1.2. Efecto del nivel de concentración sobre MOE.....	17
3.1.3. Efecto combinado del tipo de secado y nivel de concentración sobre MOE.....	17
3.2. Modulo de Ruptura (MOR).....	18
3.2.1. Efecto del tipo de secado sobre MOR.....	18
3.2.2. Efecto del nivel de concentración sobre MOR.....	18
3.2.3. Efecto combinado del tipo de secado y nivel de concentración sobre el MOR.....	19
3.3. Trabajo a máxima carga (WML).....	20
3.3.1. Efecto del tipo de secado sobre el WML.....	20
3.3.2. Efecto del nivel de concentración sobre el WML.....	20
3.3.3. Efecto combinado del tipo de secado y nivel de concentración sobre WML.....	20
4. CONCLUSIONES.....	23

4.1. Respecto del tipo de secado utilizado.....	23
4.2. Respecto del nivel de concentración logrado.....	23
4.3. Respecto del tipo de secado y nivel de retención logrado.....	23
5. BIBLIOGRAFÍA.....	25
6. ANEXOS.....	27
Anexo N° 1: Efecto del tipo de secado en el MOE.....	27
Anexo N° 2: Efecto del nivel de concentración en el MOE.....	27
Anexo N° 3: Efecto del tipo de secado en el MOR.....	27
Anexo N° 4: Efecto del nivel de concentración en el MOR.....	27
Anexo N° 5: Efecto del tipo de secado en el WML.....	27
Anexo N° 6: Efecto del nivel de concentración en el WML.....	28
Anexo N° 7: Equipo para la impregnación de la madera.....	28
Anexo X° 8: Cámara de secado.....	28
Anexo N° 9: Máquina Universal Instrom.....	29
Anexo N° 10: Probetas de corte radial – Madera de Pino radiata D. Don.....	29
Anexo N° 11: CD con datos mecánicos, y análisis realizados.....	30

INDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadros

Cuadro N° 1: Tipos de preservantes hidrosoluble ACQ.....	2
Cuadro N° 2: Valores promedios obtenidos en los grupos formados.....	10
Cuadro N° 3: Cantidades de reactivos a utilizar en la solución.....	11
Cuadro N° 4: Grupo de probetas preservadas y tipo de tratamiento de secado a aplicar.....	13
Cuadro N° 5: Etapas y condiciones del secado convencional.....	14
Cuadro N° 6: Número mínimo de observaciones a realizar.....	15
Cuadro N° 7: Diseño bifactorial de niveles fijos.....	15
Cuadro N° 8: ANDEVA para Modulo de Elasticidad (MOE).....	18
Cuadro N° 9: ANDEVA para Modulo de Ruptura (MOR).....	19
Cuadro N° 10: ANDEVA para Trabajo a Máxima Carga (WML).....	21

Figuras

Figura N° 1: Tipo de ensayo aplicado.....	4
Figura N° 2: Gráfico de Esfuerzo v/s Deformación.....	6
Figura N° 3: Impregnación de probetas.....	12
Figura N° 4: Fijación del preservante.....	13
Figura N° 5: Efecto del nivel de concentración y tipo de secado en el MOE.....	17
Figura N° 6: Efecto del nivel de concentración y tipo de secado en el MOR.....	19
Figura N° 7: Efecto del nivel de concentración y tipo de secado en el WML.....	21

RESUMEN

La madera impregnada es utilizada en un amplio espectro de productos, expuestos a distintas condiciones de servicio, ya sea al interior del hogar o a condiciones de intemperie. Dada su naturaleza orgánica, la madera sufre deterioro por la acción de agentes abióticos y bióticos, siendo estos últimos los que pueden provocar un deterioro importante de los componentes estructurales de la misma, tales como lignina y celulosa, afectando sus propiedades físicas y mecánicas. Consecuentemente, la madera usada bajo determinadas condiciones de servicio requiere de tratamientos de preservación, mediante su impregnación con compuestos químicos fungicidas e insecticidas.

La sal preservante en base a cobre, cromo y arsénico más conocida y utilizada es CCA-C. En los últimos años esta sal ha recibido una publicidad negativa, debido a problemas de salud humana relacionados con el cromo y el efecto cancerígeno del arsénico. Por lo anterior la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) anunció en febrero de 2002 la decisión voluntaria, por parte de la industria de preservación de la madera, de eliminar paulatinamente su uso. Durante décadas han sido desarrollados diversos tipos de preservantes libres de arsénico, siendo la sal ACQ la más difundida.

Pese a la protección proporcionada, el preservante, el proceso de impregnación y postratamiento de secado de la madera, degradan los componentes estructurales de la pared celular de la madera, pudiendo producir cambios importantes en las propiedades físicas y mecánicas de la misma. El efecto de ACQ-D, en las retenciones especificadas por American Wood Preservers Association (AWPA), sobre las propiedades físico-mecánicas de Pino radiata no ha sido estudiado en Chile. Esta información permitirá a la madera de Pino radiata poseer un registro EPA, necesario para la entrada de madera impregnada al mercado de EE.UU. para uso en aplicaciones residenciales.

Este trabajo tiene por objetivo evaluar el efecto que pueden ejercer los tratamientos de preservación con ACQ-D, y pos-tratamientos de secado, en las propiedades mecánicas de Módulo de Elasticidad (MOE), Módulo de Ruptura (MOR) y Trabajo a Máxima Carga (WML), en madera de Pino radiata, mediante ensayos de flexión estática.

Para este fin se utilizó madera de Pino radiata, de características y dimensiones definidas según norma ASTM D 3507 – 97 (2000) para ensayos de flexión estática. La madera fue impregnada con la sal ACQ-D, bajo distintos niveles de concentración, según estándares establecidos por AWPA, para diferentes condiciones de servicio. Luego la madera se secó bajo dos tratamientos de secado: el primero a temperatura ambiente y el segundo bajo secado convencional ($T^{\circ} \leq 70^{\circ} \text{C}$). Finalmente se aplicaron ensayos mecánicos de flexión estática, determinando los valores de MOE, MOR y WML. El objetivo fue demostrar que no existen diferencias significativas en los valores medios de las propiedades mecánicas medidas, para los distintos niveles de retención y/o tipo de secado, para lo cual se aplicó sobre los datos obtenidos, un análisis estadístico bifactorial de niveles fijos, y finalmente a través de un análisis de varianza, se determinó el efecto de los factores, de manera aislada y combinada.

Como resultado se determinó que para probetas de madera de albura de Pino radiata, los tipos de secados y niveles de concentración del preservante ACQ-D utilizados, analizados de manera aislada o en interacción, no tuvieron un efecto estadísticamente significativo sobre las propiedades de Módulo de Elasticidad (MOE), Módulo de Ruptura (MOR) y Trabajo a Máxima Carga (WML). Pese a lo anterior este efecto varió

según la propiedad, nivel de concentración y tipo de secado, observándose que la rigidez del material se ve mejorada en todos los ensayos aplicados, mientras que para el esfuerzo máximo de resistencia (MOR) y la tenacidad (WML) de la madera, dependen del nivel de concentración y tipo de secado, siendo la propiedad más afectada el WML, en los grupos preservados tratados bajo secado convencional ($T^{\circ} \leq 70$ °C).

ABSTRACT

Pressure-treated wood is used in a wide variety of products employed in both interior and exterior settings. Given its organic nature, wood suffers deterioration from both abiotic and biotic agents. The latter can cause significant damage to wood's structural components, such as lignin and cellulose, affecting their physical and mechanical properties. As such, wood that is used for certain purposes must be treated with chemicals such as fungicide and insecticide compounds.

The best-known and most widely used preservative salt is CCA-C, which is based on copper, chrome and arsenic. In recent years this salt has received negative publicity because of health problems associated with chrome and because of the carcinogenic affects of arsenic. For that reason, in February 2002, the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) announced a decision by the wood preservation industry to voluntarily stop using CCA-C. Over the past several decades, several types of arsenic-free preservatives have been developed, the most common being ACQ-D.

Despite the protection that such salts offer, the preservative itself, the impregnation procedure and the post-treatment drying of the wood break down the structural components of the wood's cell walls. That, in turn, can cause important changes to the material's physical and mechanical properties. The affect of ACQ-D on the physical-mechanical properties of *Pinus radiata* (in terms of the retention levels specified by the American Wood Preservers Association – AWPAs), has not been studied in Chile.

The objective of this study is to evaluate the affects both ACQ-D chemical treatment and post-treatment wood drying have on the mechanical properties of *Pinus radiata*. Using static bending tests, we will determine the material's ultimate breaking point, known in the field as Modulus of Rupture (MOR); relative stiffness, referred to as Modulus of Elasticity (MOE); and Work to Maximum Load (WML), which quantifies the wood's ability to absorb shock with some permanent deformation

In the static bending tests, we used *Pinus radiata* wood with characteristics and dimensions that are in accordance with the ASTM D 3507 – 97 (2000) norm. Following standards established by the AWPAs, the wood was treated with various concentrations of ACQ-D corresponding to the wood's different potential uses. Later the wood was dried using two different techniques: the first at room temperature, the second at a conventional drying temperature ($T \leq 70$ °C). We then carried out static bending tests to determine the treated wood's MOE, MOR and WML values. The objective was to demonstrate that there are no significant differences in the mean values of the mechanical properties measured. To do this, we cross-tested wood samples using all the different treatment possibilities (drying techniques and various chemical concentration levels) and later assessed the results via an analysis of variance (ANOVA) fixed-effects statistical model.

As a result, we determined that for samples of *Pinus radiata* sapwood, different drying techniques and ACQ-D concentration levels – which were analyzed in both isolation and interaction – had no significant statistical affect on the wood's MOE, MOR and WML values. Nevertheless, the different treatments did affect the wood to a degree, improving its MOE in all of the tests. In the case of the wood's MOR and WML, on the other hand, values fluctuated depending on the drying technique and chemical

concentration levels applied. The most negative effects was noted in the WML of conventionally-dried treated samples.

1. INTRODUCCIÓN

En Chile y en el mundo la madera impregnada es utilizada en un amplio espectro de productos, tanto en el área de la construcción como en el ámbito del hogar, alumbrado público, jardines y plazas. Sin embargo, dada su naturaleza orgánica, la madera está expuesta al deterioro por agentes abióticos y bióticos, siendo estos últimos los que pueden provocar un deterioro importante de los componentes estructurales de la misma, tales como lignina y celulosa, afectando sus propiedades físicas y mecánicas. Consecuentemente la madera usada en exteriores y bajo determinadas condiciones de servicio, requiere de tratamientos de preservación basados en la impregnación de la misma con compuestos químicos fungicidas e insecticidas, con el objeto de conservar las características de resistencia y apariencia que le hacen atractiva a la hora de seleccionarla como material de elaboración de otros productos.

La sal preservante en base a cobre, cromo y arsénico más conocida y utilizada es CCA-C. En los últimos años esta sal ha recibido una publicidad negativa, debido a problemas de salud humana relacionados con el cromo y al efecto cancerígeno del arsénico. Esto ha provocado una presión creciente por eliminar el uso de la sal CCA en los tratamientos de preservación (Tame *et al.*, 2005). En consecuencia, la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) anunció en febrero del 2002 la decisión voluntaria, por parte de la industria de preservación de la madera, de eliminar paulatinamente su uso en aplicaciones como las mencionadas en el párrafo anterior. En décadas anteriores diversos tipos de preservantes hidrosolubles han sido formulados para efectuar la labor de protección de la madera, entre los cuales podemos mencionar al Cobre Amonio Cuaternario (ACQ) en sus distintas versiones, preservantes boratados, Tanalith-E y otros, siendo ACQ la alternativa más difundida actualmente, por su naturaleza libre de arsénico.

1.1. Preservante hidrosoluble Cobre Alcalino Cuaternario (ACQ)

ACQ es una sal hidrosoluble que previene el ataque de hongos e insectos sobre la madera, es decir, es una sal fungicida e insecticida. En el Cuadro N° 1 se presentan las cuatro formulaciones de la sal ACQ aprobadas por la AWWPA: A, B, C y D. Estas cuatro formulaciones permiten flexibilidad en la compatibilidad con diferentes especies y usos finales. De estas cuatro formulaciones ACQ-B y ACQ-D son las más utilizadas en la actualidad, en particular la formulación D. La sal ACQ tipo B tiene una formulación amoniaca y la sal ACQ tipo D puede tener una formulación en base a amina o en base a amoniaco. Estandarizada por American Wood Preservers Association (AWPA) en el año 1992, ACQ-C es la formulación más nueva de las sales ACQ y se espera que su uso se incremente rápidamente en USA. Puede estar basada en amoniaco o amina y tiene un compuesto fungicida (QUAT) levemente diferente, Alkylbenzyl dimethyl ammonium compounds (BAC). La sal ACQ-A ha sido empleada muy poco y fue borrada de los registros de AWWPA debido a la falta de uso.

Las formulaciones en base a amoniaco (ACQ-B) son usadas para especies refractarias, como Pino Oregón, debido a que la solución de amonio, que transporta el preservante, penetra la madera con menor dificultad. En especies que no presentan dificultades a la impregnación, como es el caso de los Pinos del Sur, el uso de una formulación en base a amina (ACQ-D) permite la obtención de una superficie con una apariencia mas uniforme. Productos de madera impregnados con ACQ tipo B y D, están incluidos en AWWPA Commodity Standards (USDA Forest Service, 1999).

Cuadro N° 1: Tipos de preservantes hidrosolubles ACQ

Componente	Cobre Alcalino Cuaternario (% en peso)			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
Cobre como CuO	50	66,7	66,7	66,7
QUAT como DDAC*	50	33,3		33,3
QUAT como BAC	--		33,3	
Base de dilución	CuO disuelto en etanol-amina o amoniaco	CuO disuelto en Amoniaco en agua	CuO disuelto en etanol-amina o amoniaco	CuO disuelto en etanol-amina o amoniaco
PH	8 -11	8 – 11	8 - 11	8 -11

Fuente: Norma AWWPA Standard P5 – 05

* DDAC: Didecyldimethyl Cloruro de amonio.

La concentración de la sal es variable dependiendo de la especie a tratar. Morris *et al.* (2002) recomiendan entre 1,8 y 2,0 % para especies refractarias. En especies que no presentan dificultad al proceso de impregnación, concentraciones menores a 1,5% proporcionan una adecuada protección (Yildiz *et al.*, 2004).

1.2. Efecto del preservante, el proceso de preservación y post-tratamiento de secado sobre las propiedades mecánicas de la madera

Pese a la protección proporcionada, el preservante, el proceso de impregnación y postratamiento de secado de la madera, degradan los componentes estructurales de la pared celular de la madera, pudiendo producir cambios importantes en las propiedades físicas y mecánicas de la misma.

El efecto de ACQ en las retenciones especificadas por American Wood Preservers Association (AWPA) sobre las propiedades físico-mecánicas de Pino Radiata no ha sido estudiado aun en nuestro país. Esta información permitiría a la madera de Pino radiata poseer un registro EPA, necesario para la entrada de madera impregnada al mercado de EE.UU. para uso en aplicaciones residenciales (Montes *et al.*, 2001).

1.2.1 Mecanismo de fijación del preservante en la madera

En general los óxidos metálicos contenidos en los preservantes formulados en base a cromo (PH 1,6 a 2,5), reaccionan con los componentes de la pared celular mediante una reducción hidrolítica al ponerse en contacto con los azúcares de la madera. Por el contrario, los preservantes en base a amonio (PH \geq 11) no reaccionan con la celulosa o hemicelulosa (hexosas) de la pared celular; sin embargo, el amonio puede solubilizar y reaccionar con la lignina y hemicelulosas del tipo pentosas (Winandy, 1995).

En el caso particular de preservantes de cobre alcalino cuaternario, el amonio cuaternario en ACQ-D se fija en la madera a través de intercambio iónico con sitios aniónicos activos, y por mecanismos de adsorción. La fijación del quat es predominantemente sobre la lignina, aunque también interactúa con la holocelulosa. El componente de cobre se fija en la madera a través de reacciones de intercambio iónico entre los cationes del complejo cúprico y grupos funcionales ácidos, tales como los grupos carboxílicos de la lignina y hemicelulosa; con la celulosa en cambio, se producen enlaces de hidrogeno con los grupos hidroxilos, reemplazando la amina

funcional del complejo cúprico con el ión hidroxilo de la celulosa, precipitando así la sal carbonato de cobre (CSI, 2002).

1.2.2. Efecto del proceso de preservación sobre las propiedades mecánicas

Los tratamientos de preservación en general reducen la resistencia mecánica de la madera; Yildiz *et al.* (2004), Reyes (2000) y Winandy (1995 y 1996) así lo muestran en sus diversos ensayos de preservación de madera y posterior evaluación de sus propiedades mecánicas. Sin embargo, la magnitud de esta reducción es variable debido a la interacción de varios factores. Winandy (1995) señala que entre estos destacan, especie, propiedad mecánica a evaluar, retención obtenida, temperatura de secado, tamaño de los elementos y tipo de producto.

Los preservantes hidrosolubles afectan cada propiedad mecánica en forma diferente. Según el Wood Handbook (USDA Forest Service, 1999), si la madera es tratada de acuerdo a lo establecido por AWWA, los efectos deberían ser los siguientes: el módulo de elasticidad y los esfuerzos de compresión paralelo y perpendicular al grano, no se verán afectados o el efecto sobre estos será reducido; mientras que el módulo de ruptura y el esfuerzo de tracción paralela al grano es reducido entre un 0 y 20% (Winandy, 1995), dependiendo de la retención lograda del preservante y de la temperatura de secado del tratamiento posterior.

1.2.3. Efecto de la temperatura de secado sobre las propiedades mecánicas

El tratamiento de secado posterior al proceso de impregnación tiene un efecto importante en el proceso de fijación, el cual es definido como el estado de los componentes químicos del preservante, madera y otras sustancias, cuando todas las reacciones químicas han sido completadas.

Cuando el proceso de fijación se hace a temperatura ambiente (secado al aire) el efecto reductor del preservante en las propiedades mecánicas es leve para retenciones menores a 16 kg/m³ (Winandy, 1995). La temperatura tiende a realzar el proceso de fijación de los óxidos metálicos presentes en el preservante (Winandy, 1988), luego, a medida que aumenta la temperatura de secado, el efecto reductor del preservante en las propiedades mecánicas aumenta. Este es el caso cuando la madera, luego de ser preservada, es secada en horno de secado convencional o de alta temperatura.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

Evaluar el efecto combinado de la sal preservante ACQ-D y tipo de secado en la resistencia a la flexión estática de madera de Pino Radiata.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la variación del Módulo Elástico (MOE), Módulo de Ruptura (MOR), y Trabajo a Máxima Carga (WML) para diferentes niveles de retención de la sal preservante ACQ-D.
- Determinar el efecto de la temperatura de secado post-tratamiento en la resistencia a la flexión.

- Determinar el efecto combinado de los niveles de retención y temperatura de secado en el Módulo Elástico (MOE), Módulo de Ruptura (MOR) y Trabajo a Máxima Carga (WML).

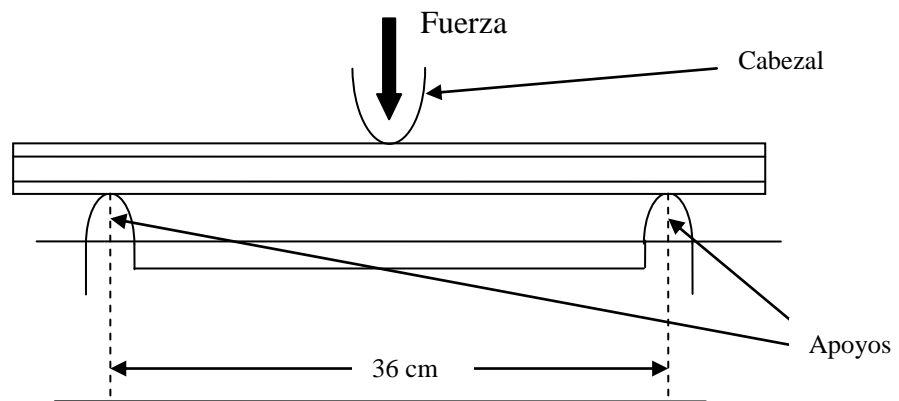
1.4. Descripción de las propiedades mecánicas

1.4.1. Flexión estática

Propiedad mecánica consistente en la resistencia que opone una viga a una carga puntual aplicada en el centro de la luz o distancia entre apoyos, en la cara radial de ésta.

Las dimensiones de la probeta a utilizar - definidas en la norma ASTM D – 143 - son: 25 mm x 25 mm x 410 mm. La velocidad de aplicación de la carga es igual a 2,5 mm/min, y la luz entre apoyos de 36 cm.

Figura N° 1: Tipo de ensayo aplicado



1.4.2. Módulo de elasticidad (MOE):

Parámetro que indica la rigidez de un material, o de otra forma la resistencia a ser deformado en forma permanente, de tal manera que cuando más rígido es el material mayor es su Módulo de Elasticidad. En la gráfica Esfuerzo v/s Deformación (figura N° 2), es equivalente a la tangente de la sección recta de la curva ($d\sigma/d\varepsilon$).

La fórmula para determinar el valor de este parámetro es la siguiente:

$$MOE = \frac{L^3 \cdot m}{48 \cdot I} \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

Donde:

MOE: Módulo de elasticidad (kg/cm^2)

L = Luz de ensayo (cm.)

m = Coeficiente angular en la parte recta del gráfico carga - deformación. (Pendiente de la recta en el gráfico carga - deformación) (Kg/cm .)

$I =$ Momento de inercia (cm^4)

1.4.3. Módulo de Ruptura (MOR):

Corresponde al esfuerzo máximo realizado por la probeta, en el momento de la falla o rompimiento de la misma.

La fórmula para determinar el valor de este parámetro en las probetas es la siguiente:

$$MOR = \frac{1,5 \cdot L \cdot P_r}{b \cdot h^2} \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

Donde:

MOR = Módulo de ruptura (kg/cm^2)

L = Luz de ensayo (cm)

P_r = carga de ruptura (kg)

b = ancho de la probeta (cm)

h = altura de la probeta (cm)

1.4.4. Trabajo a máxima carga (WML):

Parámetro que define cuan resistente y tenaz es un material sometido a esfuerzos de flexión. Muestra la capacidad de absorber energía durante la deformación plástica hasta romperse, es decir cuan cohesionadas están las partículas, o de la misma forma qué tan dúctil es el material. En el gráfico Esfuerzo v/s Deformación (figura n° 2), se determina calculando el área bajo la curva.

La fórmula para determinar el valor de este parámetro es la siguiente:

$$WML = \frac{P_r \cdot L^2}{8 \cdot E \cdot b^2 \cdot h^4} \left(\frac{kg \cdot cm}{cm^3} \right)$$

Donde:

WML = Trabajo a máxima carga ($\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$).

L = Luz de ensayo (cm).

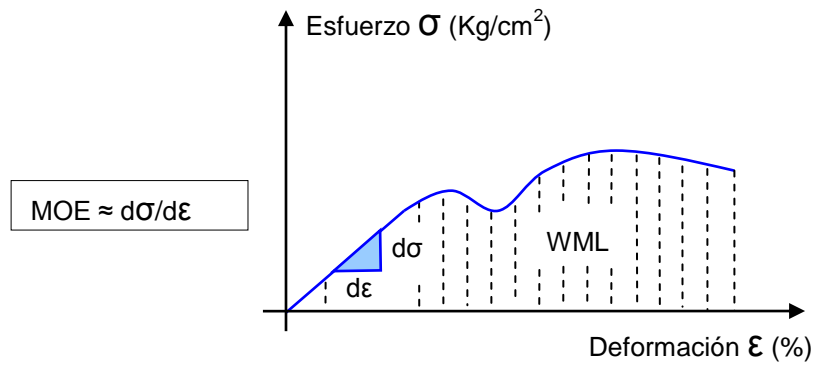
P_r = carga de ruptura (kg).

E = Módulo de elasticidad del material (kg/cm^2).

b = ancho de la probeta (cm).

h = altura de la probeta (cm).

Figura N° 2: Gráfico de Esfuerzo v/s Deformación



Donde:

Esfuerzo (σ): esfuerzo realizado por la probeta medido en Kg/cm², estimado a partir del cociente entre la carga aplicada (P) y la sección transversal de la probeta (A).

Deformación (ϵ): deformación unitaria de la probeta medida en (%), estimado a partir del cociente entre el alargamiento del material (L – L₀) y largo original del material (L₀), donde L es el largo después de aplicada la carga.

MOE: parámetro equivalente a la pendiente de la parte recta de la curva Esfuerzo v/s Deformación ($d\sigma/d\epsilon$).

WML: parámetro equivalente a la región achurada de la curva Esfuerzo v/s Deformación.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1. Material

2.1.1. Material en estudio

Para la realización de este estudio se utilizó madera comercial de Pino radiata, seca al 12 % CH y libre de defectos. La madera fue proporcionada por “Maderera El Pangué”, empresa ubicada en la ciudad de Santiago, dedicada a la fabricación y exportación de molduras.

2.1.2. Equipos utilizados para la impregnación de la madera

2.1.2.1. Cilindro de impregnación

Equipo donde se realiza la impregnación, en el cual es depositada la madera y la sal preservante (anexo nº 7). Se encuentra en el Laboratorio de Biodeterioro de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile. El cilindro está construido en fierro, y sus dimensiones son de 18,5 cm de diámetro y 86,5 cm de largo, contando con un volumen utilizable de 7400 cm³. La sección perimetral superior del tubo dispone de seis pernos que permiten la fijación de la tapa. La tapa cumple las funciones de sellado del cilindro, regular la presión de aire, y la medición de presión en el interior. Para la medición de la presión y la conexión del interior del tubo con la bomba, en la parte central de la tapa, se encuentra un manómetro y una llave de bola.

2.1.2.2. Bomba de Vacío

Para lograr el vacío en el interior del cilindro se utilizó la bomba hidráulica marca Celtiques Pompe, de 1 CV, la cual se encuentra en el Laboratorio de Biodeterioro de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile.

2.1.2.3. Equipo utilizado para el secado de la madera

La “Cámara de Secado” está ubicada en el Centro Tecnológico de la Madera del Campus Antumapu de la Universidad de Chile. Está construida en fierro y madera, material de aislamiento térmico y de humedad, y recubierta con pintura resistente a la temperatura y humedad (anexo Nº 8). Presenta un volumen interno de 3,2 m³, y cuenta con sistema de ventilación, de renovación de aire, de calefacción, y de humidificación.

- Calefacción: se obtiene a través de cinco calefactores inoxidables de 1,5 Kwh de consumo cada uno, cada cual trabaja con un potencial de 220 v.
- Humidificación: el vapor es suministrado por un recipiente con agua que posee dos calefactores eléctricos de cobre de 2 KWH de consumo, siendo capaz de entregar 13 Kg vapor saturado por hora. Para el control de la humedad relativa al interior del secador, la cámara cuenta con un sistema semiautomático marca FOXBORO de tipo neumático y un psicrómetro. A través estos dispositivos, en forma electrónica se controlan las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, que producen el gradiente psicrométrico deseado, permitiendo así obtener la humedad relativa requerida para cada etapa del programa de secado.
- Ventilación: se logra a través de dos ventiladores axiales reversibles que generan un flujo transversal a la cámara. Estos ventiladores son accionados por un motor

eléctrico trifásico de 3 HP de potencia, generando una velocidad interna del aire de 2,5 m/s, a través de la carga.

- Renovación de aire: la cámara posee cuatro ventilas, dos de admisión de aire externo y dos de expulsión del aire interno saturado de vapor de agua.

2.1.2.4. Máquina utilizada para la medición de las propiedades mecánicas

Para la determinación de las propiedades mecánicas se utilizó una Máquina Universal Neumática marca Instrom de doble columna, con capacidad de carga de 500 Kg (anexo N° 9). Esta máquina pertenece al Centro de Control de Calidad de Muebles “CATAS Chile”, ubicado en Alberto Pepper 1615, Renca, Santiago, Chile. Se enciende y controla mediante un panel electrónico, mediante el cual se pueden controlar y medir variables tales como: velocidad de carga, carga aplicada con precisión de 0,1 gramos, deflexión de la probeta con precisión de 0,01 mm., carga de ruptura, entre otras.

2.1.2.5. Otros elementos utilizados

Corresponden a otros elementos utilizados en los procesos de dimensionado, impregnación, secado y medición de propiedades mecánicas de las probetas.

- a) Sierra circular para el dimensionado de la madera, ubicada en el Centro Tecnológico de la Madera del Campus Antumapu de la Universidad de Chile.
- b) Pie de Metro de precisión 0,01 mm.
- c) Balanza Digital de precisión 0,1 g.
- d) Otros.

2.2. Metodología

2.2.1. Preparación de la madera

2.2.1.1. Selección y dimensionado de la madera

Según la norma ASTM D 3507 – 97 (2000), para la realización de los ensayos mecánicos de flexión estática en probetas pequeñas de madera, deben ser utilizadas probetas de corte radial, madera de albura, de dimensiones 50x50x760 mm.

De acuerdo a lo anterior la madera de Pino radiata fue dimensionada en el Centro Tecnológico de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile. Utilizando una sierra circular, se elaboraron probetas con una escuadría final de 25.4 x 25.4 x 410 mm., obteniéndose finalmente una cantidad mayor a 400 piezas.

Dimensionadas las probetas, de manera visual se procedió a seleccionar aquellas probetas que en sus caras transversales cumplieran la condición de tener sus anillos distribuidos radialmente, condición también denominada como corte radial (ver anexo N° 10), obteniéndose un total de 218 piezas.

2.2.1.2. Determinación de la albura y el duramen

Una vez dimensionado y clasificado el material, se procedió a la identificación de la madera de albura y duramen en la sección transversal de las probetas, con el objetivo de

seleccionar aquellas piezas con un 100% de albura en su sección. Para esto se utilizó una modificación de la metodología definida en la norma ASTM D 3507 – 97 (2000). Esta modificación se basa en la aplicación de una solución indicadora, compuesta por la mezcla de dos soluciones. La primera fue preparada mezclando 0,5 g de Benzidina en 2,5 cm³ de ácido clorhídrico, más 100 cm³ de agua destilada; la segunda en tanto consistió en una solución acuosa de nitrito de sodio al 5%. Preparadas las mezclas, mediante pinceles diferentes para cada solución, se esparció la segunda solución sobre una sección transversal de una probeta dejando reposar por 10 minutos. Luego se esparció la primera solución sobre la misma sección transversal y se dejó reposar por el mismo tiempo. Transcurrido el tiempo de reposo la madera de albura adopta una coloración amarilla intensa, mientras que la madera duraminizada se tiñó de un color rojo opaco. El proceso fue aplicado a todas las probetas de madera, seleccionando para los ensayos de flexión sólo aquellas que cumplieran la condición de 100% albura.

2.2.1.3. Determinación de la densidad

Esta propiedad indica la cantidad de material leñoso que existe por unidad de volumen de la pieza, existiendo tres tipos básicos:

- Densidad básica: definida como el cociente entre el peso seco de la madera y su volumen verde.
- Densidad húmeda: definida como el cociente entre el peso y volumen verde de la madera.
- Densidad anhidra: definida como el cociente entre el peso y volumen seco de la madera.

El peso de la madera es expresado en gramos (g) y el volumen en centímetros cúbicos (cm³).

Para poder hacer el agrupamiento posterior de las probetas, se debe conocer la “Densidad húmeda” de las mismas, por lo tanto se midió el volumen y el peso de cada una de ellas. Utilizando un pie de metro de precisión 0,01 mm., se tomaron medidas del espesor, ancho y largo, y mediante una balanza digital de 0,1 g de precisión, se procedió a determinar el peso de las piezas. Con estas medidas se procedió a determinar las densidades húmedas de cada una de las probetas.

2.2.1.4. Formación de grupos de densidad homogénea

El objetivo de este procedimiento fue disminuir el efecto de la variabilidad de densidad presente en las probetas en el análisis estadístico de resultados. La elección de la densidad como criterio de agrupamiento se debe a que esta propiedad física es la que está más correlacionada con la resistencia mecánica (USDA Forest Service, 1999).

Clasificadas las probetas en 100% Albura y determinada su densidad húmeda, se procedió a aplicar la metodología definida por Cai *et al.* (1996) para formar grupos que tuvieran valores promedios de densidad y desviación estándar similar.

Como primer paso se determinó la densidad de cada una de las probetas, basándose en la fórmula de densidad húmeda descrita en el punto anterior.

Como segundo paso se procedió a enumerar las probetas de menor a mayor valor de densidad. Finalizada la enumeración fueron construidos doce grupos (denominados genéricamente como A, B, C, D,....., L) los cuales contenían 15 probetas cada uno. Para la construcción de los grupos, la probeta con el valor más bajo de densidad fue asignada al grupo A, la siguiente probeta menos densa asignada al grupo B, y así sucesivamente para los grupos C, D,....., L. En la segunda corrida de asignación de probetas, la probeta menos densa de aquellas no asignadas (Probeta N° 13) fue colocada en el grupo B, la siguiente al grupo C, y así sucesivamente para los grupos D,....., L y A. En la siguiente iteración, el proceso de distribución comenzó de la misma forma, partiendo en el grupo C, hasta llegar al grupo B. El proceso de distribución de probetas se repitió, siguiendo el patrón de asignación anterior, hasta terminar las probetas disponibles, obteniéndose doce grupos de 15 probetas cada uno, uno por cada nivel de retención y grupo de secado, además de los grupos testigos.

Cuadro N° 2: Valores promedios obtenidos en los grupos formados

Grupo	Alto (mm)	Ancho (mm)	Largo (cm)	Vol. (cm ³)	Peso (g)	D _{12%,12%} (g/cm ³)	Des. Est. (g/cm ³)
A	25.26	25.29	41.10	262.56	127.27	0.4847	0.0361
B	25.21	25.27	41.10	261.91	127.03	0.4850	0.0361
C	25.21	25.28	41.10	261.91	126.91	0.4846	0.0355
D	25.22	25.25	41.10	261.74	126.59	0.4837	0.0325
E	25.21	25.26	41.10	261.75	126.74	0.4841	0.0323
F	25.24	25.28	41.10	262.19	127.11	0.4848	0.0323
G	25.26	25.27	41.10	262.32	127.21	0.4850	0.0326
H	25.26	25.27	41.10	262.43	127.50	0.4858	0.0307
I	25.31	25.25	41.10	262.60	127.71	0.4864	0.0305
J	25.32	25.29	41.10	263.19	128.05	0.4867	0.0301
K	25.24	25.28	41.10	262.28	127.72	0.4869	0.0300
L	25.27	25.25	41.10	261.90	126.45	0.4930	0.0330

Como se observa en el cuadro N°2, tanto la densidad como las desviación estándar promedio de los grupos formados es muy similar, lográndose el objetivo inicial de homogenización.

2.2.2. Impregnación de las probetas

2.2.2.1. Distribución de los grupos para impregnar

Los tratamientos de preservación fueron asignados de forma aleatoria a 10 grupos. Las probetas se impregnaron bajo cinco niveles de retención del preservante, definidos por la AWPA como: 4,0; 6,4; 9,6; 12,8 y 16 Kg./m³. Específicamente, 2 grupos (30 probetas) fueron impregnados a un nivel de retención de 4,0 Kg./m³, otros dos grupos a 6,4 Kg./m³ y de esta forma hasta completar los 10 grupos y retenciones restantes. Los grupos de probetas restantes fueron utilizados para control y por lo tanto impregnadas con agua.

2.2.2.2. Preparación de las sal preservante

La sal preservante ACQ-D, está compuesta por la mezcla de dos reactivos llamados ACQ-C2 y Q50. Para determinar las cantidades adecuadas de estos en la solución, con el objetivo de lograr las concentraciones definidas por la norma ASTM, observando el cuadro N° 3. Las cantidades de reactivos a utilizar dependerán de la concentración deseada, de la absorción de agua promedio de las probetas de pino (650 Kg/m³), del

volumen de solución preservante a preparar para la impregnación, y de la concentración de cada reactivo.

Cuadro N° 3: Cantidades de reactivos a utilizar en la solución preservante

Concentración de la Sal Preservante (Kg/m ³)	Concentración de Activos en Solución (%)	Activos Totales en Solución (Kg)*	ACQ-C2 en la solución (Kg)	Q50 en la solución (Kg)**
16,0	16,0/650 = 2.46	0,1723	1,0211	0,1149
12,8	12.8/650 = 1.97	0,1378	0,8169	0,0919
9,6	9.6/650 = 1.48	0,1034	0,6126	0,0689
6,4	6.4/650 = 0.98	0,0689	0,4084	0,0459
4,0	4.0/650 = 0.62	0,0431	0,2553	0,0287

La “Concentración de Activos en Solución (%)”, es el porcentaje en peso de reactivos que debe contener la solución para lograr la concentración deseada en las probetas a impregnar. Esta fue determinada haciendo el cuociente:

Concentración de Activos en Solución (%) = Concentración de la Sal Preservante (Kg/m³) / Absorción de Agua Promedio de las Probetas (Kg/m³)

La absorción de agua promedio en las probetas de madera de Pino radiata, fue determinada utilizando la metodología descrita en el punto 2.2.2.4, utilizando una muestra de probetas impregnadas con agua.

La cantidad de “Activos Totales en Solución (Kg)” corresponde al peso total de ACQ-C2 y Q50, necesarios en la solución para lograr la concentración deseada. Esta cantidad depende del volumen de solución preservante necesario para realizar un proceso de impregnación y de la “Concentración de Activos en Solución”. En nuestro caso el volumen de solución a preparar fue determinado considerando que:

- Para cada concentración se desean impregnar 30 probetas, equivalentes a 2 grupos de análisis.
- El volumen de cada probeta es de 25x25x410 mm, lo que es equivalente a 0,171 litros.
- Luego, el volumen total de madera a ser impregnado es: 30 Probetas * 0,171 litros/probetas, lo que es igual a 5,2 litros de volumen de madera.

Se determinó que el volumen de solución de sal preservante a preparar es de 5,2 lt por grupo de concentración, el cual considerando un factor de seguridad por perdidas en el proceso asociado al trasvasije, sé incrementó a 7 litros por grupo de concentración.

Como ejemplo, en el cuadro N° 3 se observa que para una concentración de sal de 16 Kg/m³, se necesita que la “Concentración de Activos en Solución” sea igual al 2,46% del peso de la solución. Considerando que serán preparados 7 litros de solución, y considerando la densidad del agua igual 1, entonces para este nivel de concentración se necesitaran 0,1723 Kg de reactivos en la mezcla, equivalente al 2,46% del peso de los 7 litros de solución a preparar.

Luego, para determinar la cantidad de cada uno de los reactivos en la mezcla según la cantidad de “Activos Totales en Solución”, se utilizó la siguiente fórmula:

$$R = (\text{“Activos Totales en Solución”} \times P) / C$$

Donde:

R = cantidad de reactivo a utilizar en la solución, en Kg.

P = proporción del reactivo ACQ-C2 o Q50, en la solución. En el caso de ACQ-C2 es 2/3 y para Q50 es 1/3.

C = concentración del reactivo. Para el caso de ACQ-C2 es 0,1125 y para Q50 es 0,5.

2.2.2.3. Impregnación de la madera

Distribuidas las concentraciones a los grupos de probetas y preparadas las soluciones de la sal preservante, se dio inicio al proceso de impregnación.

El cilindro fue cargado con la solución preservante y un grupo de preservación (15 probetas), ver figura N° 3, para una concentración específica deseada, ambas a temperatura ambiente. Cerrado el cilindro, el proceso comenzó con un vacío inicial, hasta alcanzar una presión negativa de -1 kg/cm^2 , manteniéndose en este estado por 15 minutos. Transcurrido el tiempo de vacío la presión fue liberada hasta llegar a presión atmosférica, manteniéndose en este estado por 15 minutos. Finalizado el proceso, las probetas de madera fueron removidas de la solución, limpiando el preservante sobrante de la superficie de las piezas, para finalmente pesar y determinar la absorción lograda.

Figura N° 3: Impregnación de probetas



2.2.2.4. Determinación de la absorción en las probetas

Anterior y posterior al proceso de impregnación, se determinó mediante balanza digital de precisión de 0,1 g. los pesos de las probetas. Luego, utilizando las medidas de las probetas de espesor, ancho y largo, tomadas después de dimensionadas, se determinó el volumen de las mismas. Finalmente se determinó la absorción de preservante en cada una de ellas, utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Absorción (g/cm}^3\text{)} = (P_{f\text{-imp}} - P_{i\text{-imp}}) / V_p$$

Donde:

Absorción (g/cm^3): absorción de la probeta en g/cm^3 , finalizado el proceso de impregnación.

$P_{f\text{-imp}}$: peso final de la probeta en g, finalizado el proceso de impregnación.

P_{i-imp} : peso inicial de la probeta en g, antes del proceso de impregnación.

V_p : volumen de la probeta en cm^3 , antes del proceso de impregnación.

Pesadas las probetas, fueron envueltas en plástico por una semana a temperatura ambiente para permitir la fijación de la solución en la madera (Figura N° 4).

Figura N° 4: Fijación del preservante



2.2.3. Secado de la madera

2.2.3.1. Tipos de secado aplicados

Se aplicaron dos tipos de secado, secado a temperatura ambiente (SA) y secado convencional (SC), uno por grupo de probetas y concentración.

2.2.3.2. Distribución de los grupos para secado

Finalizada la etapa de fijación del preservante en las probetas impregnadas, un grupo con la retención mínima de preservante ($4,0 \text{ Kg./m}^3$) fue secado a temperatura ambiente, mientras que el otro grupo impregnado al mismo nivel fue tratado bajo secado convencional. Los procesos de secado se asignaron de manera aleatoria y de la misma forma para los grupos de probetas restantes preservados a retenciones mayores. De forma esquemática el experimento quedó como se muestra en el Cuadro N° 4:

Cuadro N° 4: Grupo de probetas preservadas y tipo de tratamiento de secado aplicado

Grupo de Probetas	Tipo de Secado	
Grupos H y L, impregnados con agua	SA	SC
Grupo A y C a $4,0 \text{ Kg./m}^3$	SA	SC
Grupo B y K a $6,4 \text{ Kg./m}^3$	SA	SC
Grupo E y I a $9,6 \text{ Kg./m}^3$	SA	SC
Grupo G y D a $12,8 \text{ Kg./m}^3$	SA	SC
Grupo F y J a $16,0 \text{ Kg./m}^3$	SA	SC

2.2.3.3. Secado convencional

Previo al ingreso al secador, las probetas impregnadas fueron encastilladas utilizando separadores de 19 mm de espesor, con el objetivo de facilitar el flujo de aire caliente a través de las mismas. Además se dispusieron pesos de madera densa sobre el castillo, para evitar el alabeo producto de la contracción que sufre la madera en el proceso.

El proceso de secado fue controlado en sus distintas etapas mediante la medición del contenido de humedad de probetas control. De esta forma, durante períodos de tiempo de 1 hora y utilizando el método de pesada, se determinó el contenido de humedad de las mismas, estimándose el contenido de humedad de la carga.

El proceso de secado utilizado incluyó las etapas y condiciones de bulbo seco y bulbo húmedo que se indican en el cuadro N° 5, el que se presenta a continuación.

Cuadro N° 5: Etapas y condiciones del secado convencional

Estado	CH (%) Madera	Temperatura (°C)		HR (%)	CH _{eq} (%)	Tiempo (Horas)
		Bulbo Seco	Bulbo Húmedo			
Vaporizado Inicial	verde a 93	66	64	90.8	17.1	5
Secado	93 a 22	65	58	70.0	10.5	17
Vaporizado Intermedio	22 a 20,1	60	58	90.0	17.5	5
Secado	20,1 a 11,2	65	52	49.8	7.8	7.5
Secado	11.2 a 8.5	70	48	30.0	4.1	2
Vaporizado Final	8.5 a 11	60	56	81.0	13.5	2.75

Terminado el proceso se midió el contenido de humedad final de las probetas control, obteniéndose un valor aproximado de 12%.

2.2.3.4. Secado a temperatura ambiente

Las probetas impregnadas fueron encastilladas utilizando separadores de 19 mm, y expuestas a condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa durante los meses de Febrero y Marzo del año 2008, período estival en Santiago.

Cada tres semanas se determinó el contenido de humedad de una muestra de probetas, utilizando el método de pesada. Durante el segundo mes se observó que la madera había alcanzado el contenido de humedad deseado del 12%.

2.2.4. Determinación de propiedades mecánicas

Para cada probeta de madera se midieron las propiedades mecánicas de Modulo de Elasticidad (MOE), Modulo de Ruptura (MOR) y Trabajo a Máxima Carga (WML), determinadas mediante la aplicación de ensayos de flexión estática y utilizando las fórmulas descritas en el punto 1.4.

2.2.4.1. Preparación de las probetas

Previo al proceso de determinación de las propiedades mecánicas mencionadas, las probetas impregnadas y secas fueron estabilizadas en una habitación, a condiciones de CH y temperatura adecuadas para mantener el contenido de humedad de las mismas en un 12%.

2.2.4.2. Número mínimo de observaciones

El número de repeticiones para la medición de las propiedades mecánicas de MOE, MOR y WML, fue de 15 para cada nivel de retención y tipo de secado aplicado. En el cuadro N° 6 se puede verificar el número total de observaciones a realizar en el experimento. Las propiedades de CH y densidad no fueron comparadas debido a que son independientes a la aplicación de los tratamientos de secado, y por lo tanto sólo fueron utilizadas como variables de control, con el fin de asegurar la igualdad de condiciones físicas de las probetas de madera ensayadas, y poder efectuar las pruebas de hipótesis en el posterior análisis estadístico de los datos.

Cuadro N° 6: Número mínimo de observaciones a realizar

Niveles de Retención	Tratamientos de Secado	Propiedades Mecánicas	Repeticiones por Propiedad	N° de OBSERV. Totales
6	2	3	15	540

2.2.5. Análisis estadístico de los resultados

Para determinar si existen diferencias en los valores promedios de las propiedades mecánicas de módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidad (MOE) y trabajo a máxima carga (WML), determinadas bajo distintos niveles de retención y tipo de secado, se realizó un análisis estadístico bifactorial de niveles fijos. El modelo utilizado fue el siguiente:

$$y_{ijk} = \mu + \text{Ret}_i + \text{Temp}_j + \text{Ret}_i \times \text{Temp}_j + \varepsilon_{ijk}, \text{ donde:}$$

y_{ijk} = valor observado de MOE, MOR o WML.

μ = valor medio de MOE, MOR o WML.

Ret_i = efecto del i-ésimo nivel de retención, con $i = 1, \dots, 6$.

Temp_j = efecto del j-ésimo nivel de temperatura, con $j = 1$ y 2 .

$\text{Ret}_i \times \text{Temp}_j$ = Interacción entre el i-ésimo nivel de retención con el j-ésimo nivel de temperatura.

ε_{ijk} = error experimental asociado con y_{ijk} .

De manera esquemática, el cuadro N° 7 muestra la combinación de tratamientos a considerar en el experimento.

Cuadro N° 7: Diseño bifactorial de niveles fijos.

Nivel de Retención / Tipo de Secado	IMPREG. Agua	4,0 Kg./m ³	6,4 Kg./m ³	9,6 Kg./m ³	12,8 Kg./m ³	16 Kg./m ³
Al aire	x	x	x	x	x	x
Secado convencional	x	x	x	x	x	x

La prueba de hipótesis a demostrar es que a un nivel de 95% de confianza, “No existen diferencias significativas en los valores medios de las propiedades mecánicas medidas, para los distintos niveles de retención y/o tipo de secado.

A través de un análisis de varianza se determinó el efecto de cada factor y en interacción con respecto a la variable medida. Para los casos en que los factores analizados produjeran diferencias significativas entre los valores medios de los tratamientos, se aplicó la Prueba de Medias de Duncan, para visualizar entre qué valores medios se dan estas diferencias.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Modulo de elasticidad (MOE)

3.1.1. Efecto del tipo de secado sobre MOE

Analizando el efecto del tipo de secado sobre el MOE, se observó que este factor no ejerce un efecto significativo en los grupos de probetas impregnados. De tal forma, para los grupos tratados bajo secado convencional, se obtuvo un valor promedio inferior en un 1,2% en relación a aquellos grupos secos a temperatura ambiente (ver anexo N° 1). Lo anterior queda demostrado por el valor de P (0,69) en el ANDEVA mostrado en el cuadro N° 8.

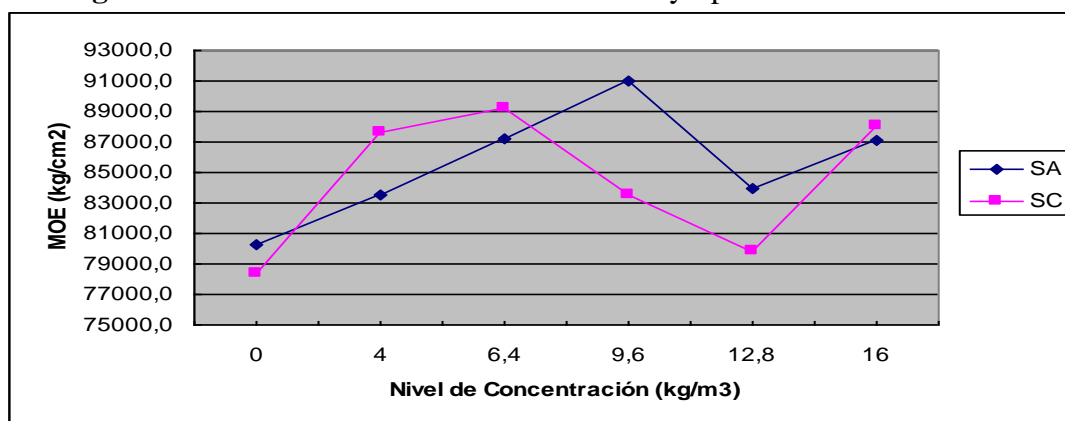
3.1.2. Efecto del nivel de concentración sobre MOE

Analizando el efecto aislado del nivel de concentración en los valores medios de MOE de los grupos preservados, se encontró que todos ellos muestran en promedio un aumento de un 8,6% en relación al grupo control (ver anexo N° 2). Se descartó la posibilidad de un incremento del MOE producto del valor promedio de las propiedades físicas de densidad y contenido de humedad, dada la homogeneidad de las mismas, moviéndose en rangos de 0,50 a 0,51 g/cm³ para la primera, y 12,8 a 13,4% para la segunda, y no guardando el MOE una relación proporcional con estas propiedades. Pese al incremento observado, no existe evidencia para determinar que este factor ejerce una influencia estadísticamente significativa sobre este parámetro, dado el valor de P igual a 0,26 mostrado en el ANDEVA (cuadro N° 8).

3.1.3. Efecto combinado del tipo de secado y nivel de concentración sobre MOE

El MOE tiende a sufrir un incremento en su valor medio producto del aumento de la concentración utilizada, sólo hasta el nivel de 9,6 kg/m³ en aquellos grupos secos a temperatura ambiente, y hasta 6,4 kg/m³ en aquellos tratados bajo secado convencional. El efecto combinado del nivel de concentración y tipo de secado se hace presente sólo a partir de los niveles de concentración anteriores, produciendo una disminución de los valores del MOE, que sin embargo tiende a desaparecer en el nivel de concentración de 16 kg/m³, punto en el cual se observa nuevamente un incremento de MOE. Lo anterior se puede observar en la siguiente figura.

Figura N°5: Efecto del nivel de concentración y tipo de secado en el MOE



Dado el valor de P de 0,81 mostrado en el ANDEVA del cuadro N° 8, se puede concluir que el efecto combinado del nivel de concentración y tipo de secado no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre los valores medios de MOE de los grupos de probetas ensayados.

Cuadro N° 8: ANDEVA para Módulo de Elasticidad (MOE)

Factores	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	P
Tipo de Secado	1	48.729.607	48729607	0,16	0,69
Nivel de Concentración (Kg/m ³)	5	1.938.269.243	387653849	1,29	0,27
Secado/Concentración	5	682.923.579	136584716	0,46	0,81
Error	168	50.307.925.171	299451936		

Ensayos realizados por Chemical Specialties (CSI, 2005), con probetas de Pino del sur impregnadas con ACQ-D y CCA-C a un nivel de concentración de 6,4 kg/m³, y luego secas a temperatura ambiente y bajo secado convencional, mostraron que para el primer grupo el valor medio de MOE disminuyó en un 3,5% con ACQ-D y 1,4% con CCA-C respecto al grupo de control. De igual forma los grupos tratados bajo secado convencional presentaron valores menores en un 6,6 % para ACD-D y 8,5% para CCA-C, aunque en todos los casos este decremento no fue estadísticamente significativo. El mismo ensayo fue aplicado sobre probetas de Pino palustris, encontrándose que para el grupo seco a temperatura ambiente los valores de MOE aumentaron en un 13,3% con ACQ-D y un 6,2% con CCA-C con relación al grupo control. Igualmente para aquellos grupos tratados bajo secado convencional se observaron incrementos de un 12,5% con ACQ-D y 6,2% con CCA-C; pese a lo anterior estas mejoras en el MOE no fueron estadísticamente significativas.

3.2. Modulo de Ruptura (MOR)

3.2.1. Efecto del tipo de secado sobre MOR

Analizando los valores medios de MOR obtenidos para los dos tipos de secado (anexo N° 3), se observa que aquellos grupos tratados bajo secado convencional presentan un valor medio un 2,8% menor con respecto a aquellos secos al aire. Lo anterior indica que el nivel de temperatura podría disminuir el MOR de la madera preservada, bajando su capacidad de absorber energía antes de producirse la ruptura. Pese a lo anterior esta disminución no es estadísticamente significativa, dado el valor de P de 0,19; mostrado en el ANDEVA del cuadro N° 9.

3.2.2. Efecto del nivel de concentración sobre MOR

El nivel de concentración de la sal preservante en los grupos de probetas impregnadas, tiene un efecto incremental leve sobre los valores medios del MOR, observándose que para los distintos niveles de concentración utilizados este parámetro se mueve en un rango entre 1,6 y 4,1% mayor con respecto al valor medio observado del grupo control (anexo N° 4). El máximo valor medio lo alcanza el grupo de nivel de concentración de

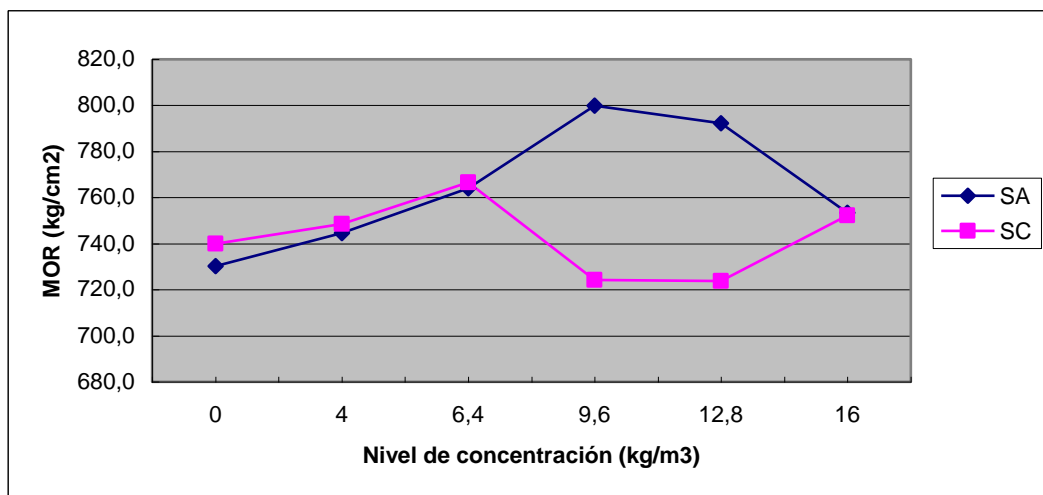
6,4 kg/m³, con 765,3 kg/cm². Pese a lo anterior, este aumento no es estadísticamente significativo dado el valor de P de 0,91 mostrado en el ANDEVA del cuadro N° 9.

3.2.3. Efecto combinado del tipo de secado y nivel de concentración sobre el MOR

Como se observa en la figura N° 6, en aquellos grupos de probetas secas a temperatura ambiente, y sólo hasta el nivel de concentración de 9,6 kg/m³, el valor medio del MOR aumenta hasta un 9,6% sobre el grupo control. Luego, a partir de este punto comienza a descender hasta el nivel de concentración de 16 kg/m³, quedando tan solo un 3,6% sobre el grupo control.

Un patrón similar se presenta en aquellos grupos tratados bajo secado convencional, donde hasta el nivel de concentración de 6,4 Kg/m³, los valores medios de MOR aumentan alcanzando un 3,6% sobre el valor medio del grupo control, nivel a partir del cual los valores promedio de MOR caen hasta un -2,2 %, en la concentración de 12,8 kg/m³. Contrario al comportamiento descendiente del MOR de los grupos secos a temperatura ambiente con nivel de concentración 16 kg/m³, en este grupo el valor medio del MOR aumenta, quedando un 1,7% sobre el grupo control (figura N° 6).

Figura N° 6: Efecto del nivel de concentración y tipo de secado en el MOR



Pese a la variación mostrada, el ANDEVA del cuadro N° 9 nos indica que el efecto combinado del nivel de concentración del preservante y el tipo de secado, no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el MOR, dado el valor de P de 0,44.

Cuadro N° 9: ANDEVA para Modulo de Ruptura (MOR)

Factores	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	P
Tipo de Secado	1	20.985	20.985	1,74	0,19
Nivel de Concentración (Kg/m3)	5	18.578	3.716	0,31	0,91
Secado/Concentración	5	58.193	11.639	0,97	0,44
Error	168	2.021.946	12.035		

Resultados similares muestran los estudios realizados por Bendtsen *et al.* (1983; cita Winandy 1995), el cual ensayó probetas de madera de *Pinus palustris* con 3 tipos de preservante - CCA tipo A y B, y ACA -, a niveles de concentración de hasta 40 Kg/m³, y que luego fueron secados bajo tratamiento convencional, determinando que aquellas probetas impregnadas con CCA tipo B a 40 Kg/m³, y aquellas tratadas con CCA tipo A a niveles entre 9,6 y 40 Kg/m³, mostraron una disminución significativa en este parámetro; mientras que aquellas probetas tratadas con ACA, a todos los niveles de concentración, tuvieron una disminución entre un 11 y 16% en el valor medio del MOR, más no fueron estadísticamente significativos. Similar al caso anterior es el ensayo sobre probetas de Pino del sur y Pino palustris, impregnadas a un nivel de concentración de 6,4 kg/m³ con ACD-D base amina, y luego secadas bajo tratamiento convencional, donde los resultados mostraron que el valor medio del MOR sufría una disminución, más no fue estadísticamente significativa (CSI, 2005).

3.3. Trabajo a máxima carga (WML)

3.3.1. Efecto del tipo de secado sobre el WML

Analizando los valores medios de WML en los dos grupos de secado, se observa que aquellos grupos secos bajo tratamiento convencional son un 4,2% inferior al valor medio de aquellos secos a temperatura ambiente. Al observar los valores medios de densidad y contenido de humedad de ambos grupos, se descarta la posibilidad de una disminución producto de estos parámetros, dada la homogeneidad de las mismas (anexo N° 5), y no guardando el WML una relación con estas propiedades.

Lo anterior podría indicar que el nivel de temperatura utilizado en el secado de las probetas, disminuye la capacidad de la madera de realizar trabajo a máxima carga. Pese a lo anterior el ANDEVA mostrado en el cuadro N° 10, indica que el factor tipo de secado no ejerce un efecto estadísticamente significativo sobre el valor de WML, dado el valor de P igual a 0,15.

3.3.2. Efecto del nivel de concentración sobre el WML

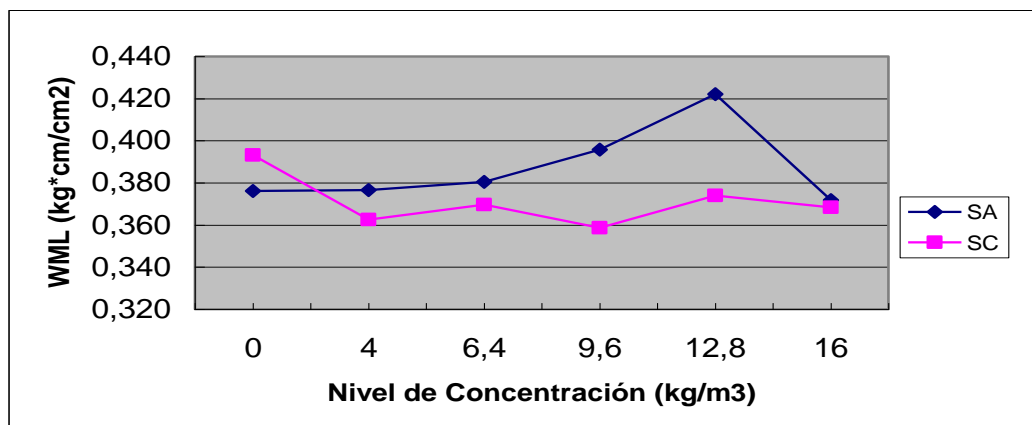
Al analizar los valores medios de WML en los grupos preservados a distintos niveles de concentración (anexo N° 6), se puede ver que en 4 de 5 grupos, el aumento de esta variable disminuye en algún grado el valor de este parámetro, moviéndose el WML en un rango de 1,9 a 3,9% inferior al grupo control. Un efecto inverso al anterior se observa en el grupo con nivel de concentración 12,8 Kg/m³, donde el valor de WML fue un 3,5% superior al grupo control. Dada la homogeneidad de las propiedades físicas de densidad y contenido de humedad en los grupos, se descarta la variación de WML producto de las mismas. Pese a lo anterior el ANDEVA mostrado en el cuadro N° 10, dado el valor de P de 0,68, nos muestra que este factor no ejerce un efecto significativo.

3.3.3. Efecto combinado del tipo de secado y nivel de concentración sobre WML

Analizando las curvas mostradas en la figura N° 7, observamos que en 4 de 5 grupos secos a temperatura ambiente, a medida que se incrementa el nivel de concentración del preservante, los valores medios de WML aumentan, alcanzando su punto máximo en el nivel de 12,8 Kg/m³, con un 12,3% superior al valor medio del grupo control. Esta tendencia se invierte en el último grupo de concentración 16 Kg/m³, donde el valor medio de WML es un 1,1% inferior al valor medio del grupo control.

Dado que la densidad de los grupos impregnados oscila entre valores de 0,50 y 0,52 g/cm³, y considerando el comportamiento del último grupo de nivel de concentración de 16 kg/m³, se descarta un aumento del valor medio del WML asociado a esta propiedad física.

Figura N° 7: Efecto del nivel de concentración y tipo de secado en el WML



En tanto para aquellos grupos secos bajo tratamiento convencional, y en contraste a aquellos que fueron secados a temperatura ambiente, en todos los niveles de concentración se observa una disminución del valor medio de WML, mostrando una oscilación en un rango de 4,9 a 8,8% por debajo del valor medio observado del grupo control. El menor valor se produce en el grupo de concentración 9,6 Kg/m³.

Por lo anteriormente expuesto, es posible suponer que la combinación del tipo de secado y nivel de concentración tiene dos efectos dependiendo del tipo de secado aplicado. De esta forma, para aquellos grupos tratados bajo secado convencional, ambos factores ejercen un efecto negativo sobre los valores medios de WML, observándose que a medida que aumenta el nivel de concentración y sólo hasta el nivel de 12,8 Kg/m³, los valores medios de WML decrecen hasta un 8,8%. Para aquellos grupos secos a temperatura ambiente, a medida que se incrementa la concentración hasta el nivel de 12,8 Kg/m³, los valores medios de WML aumentan hasta un 12,3% con respecto al grupo control. En ambos grupos de secado, en el nivel de concentración de 16 Kg/m³, se produce una disminución del valor medio de WML.

Pese a lo anterior, el ANDEVA mostrado en el cuadro N° 10 nos muestra que el valor de P es igual 0,60, por lo tanto se concluye que el efecto combinado del tipo de secado y nivel de concentración no ejercen un efecto significativo sobre los valores de WML, con respecto a los grupos de control.

Cuadro N° 10: ANDEVA para Trabajo a Máxima Carga (WML)

Factores	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	P
Tipo de Secado	1	0,01162	0,01162	2,05	0,15
Nivel de Concentración	5	0,01756	0,00351	0,62	0,68
Secado/Concentración	5	0,02074	0,00415	0,73	0,60
Error	168	0,95005	0,00566		

En ensayos realizados por Bendtsen *et al.* (1983; citado por Winandy, 1995), sobre probetas de madera de Pino palustris impregnadas con ACA a distintos niveles de concentración, y luego tratadas bajo secado convencional, encontraron que el valor medio de WML sufría una disminución en rangos de 16 a 50%, con diferencias estadísticamente significativas en todos los niveles. Contrario a esto fueron los resultados mostrados por Chemical Specialties (CSI, 2005), quienes ensayando probetas de Pino del sur impregnadas con ACQ-D y CCA-C, y luego tratadas bajo secado a temperatura ambiente y secado convencional, encontraron que para el primer grupo la variación de WML fue leve, mientras que para los grupos secos en horno se observó que el valor medio de WML disminuyó en un 28,4% para ACD-D y 5,2% para CCA-C, aunque este decremento no fue estadísticamente significativo. De igual forma fue aplicado el mismo ensayo sobre probetas de Pino palustris, encontrando que para el grupo seco a temperatura ambiente los valores de WML mejoraban levemente con ambos preservantes, mientras que para aquellos grupos secos en horno los valores medios de WML variaban levemente con relación al grupo control.

4. CONCLUSIONES

4.1. Respecto del tipo de secado utilizado

1.- Los tipos de tratamiento de secado aplicados a probetas de madera de albura de Pino radiata impregnadas con ACQ-D a distintos niveles de concentración, no tienen incidencia estadísticamente significativa sobre las propiedades Módulo de Elasticidad (MOE), Módulo de Ruptura (MOR) y Trabajo a Máxima Carga (WML), determinadas a partir de ensayos de flexión estática.

2.- Pese a lo anterior, los grupos de probetas tratadas bajo secado convencional sufren una disminución del desempeño mecánico en las propiedades MOE, MOR y WML, en comparación con aquellas probetas secas a temperatura ambiente.

3.- La propiedad mecánica de flexión estática más afectada de aquellas probetas secas en horno es el Trabajo a Máxima Carga, y las menos afectadas son el Módulo de Elasticidad y Módulo de Ruptura. Por lo anterior podemos concluir que el tipo de secado podría disminuir la cohesión entre los componentes estructurales de la madera, básicamente Celulosa y Lignina, disminuyendo la capacidad de absorber energía durante la deformación plástica, antes de producirse la ruptura.

4.2. Respecto del nivel de concentración de ACQ-D

4.- El nivel de concentración utilizado en los grupos de probetas impregnados, no tiene un efecto significativo sobre los valores de las propiedades Módulo de Elasticidad (MOE), Módulo de Ruptura (MOR) y Trabajo a Máxima Carga (WML), determinadas a partir de ensayos de flexión estática.

5.- El grado de concentración logrado en la madera, mejora el MOE a niveles no significativos y por lo tanto la rigidez de este material.

6.- En general, en los grupos impregnados se observa un incremento del MOR. Pese a lo anterior se verifica una disminución importante en el valor medio de esta propiedad, en los niveles intermedios de retención de aquellos grupos tratados bajo secado convencional.

7.- A niveles no estadísticamente significativos, el grado de retención logrado en las probetas produce un decremento del WML.

4.3. Respecto del tipo de secado y nivel de retención logrado

8.- Para probetas de madera de albura de Pino radiata, los tipos de secado y niveles de concentración del preservante ACQ-D utilizados, no tienen un efecto estadísticamente significativo sobre las propiedades Módulo de Elasticidad (MOE), Módulo de Ruptura (MOR) y Trabajo a Máxima Carga (WML).

9.- Sin perjuicio de lo anterior, se observa una mejora en la rigidez del material, o de igual forma un incremento en el MOE, independiente del tipo de secado y nivel de concentración del preservante utilizado, en tanto que para el Módulo de Ruptura y Trabajo a Máxima carga, sus rendimientos mejoran o empeoran dependiendo principalmente del tratamiento de secado utilizado.

10.- El efecto combinado del grado de concentración del preservante y tratamiento de secado utilizado, a niveles no estadísticamente significativos, mejora los valores del MOR de la madera seca a temperatura ambiente, mientras que para aquella tratada bajo secado convencional, un efecto positivo o negativo depende del nivel de concentración de la sal preservante.

11.- Por otra parte el WML, o de igual forma la capacidad de absorber energía durante la deformación plástica (tenacidad del material), a niveles no estadísticamente significativos, se ve mejorado para aquellos grupos secos a temperatura ambiente y empeorada para aquellos tratados bajo secado convencional.

12.- En vista de los resultados, pareciera que la interacción entre el tratamiento de secado y nivel de concentración del preservante, muestra efectos negativos para las propiedades mecánicas de MOR y WML, en los grupos tratados bajo secado convencional a partir de los niveles intermedios de concentración. Por lo anterior sería interesante hacer el análisis utilizando un tratamiento de secado a alta temperatura, con probetas impregnadas de madera de albura o duramen de mayor tamaño, de tal forma de cuantificar si el efecto negativo se mantiene o se incrementa, a niveles no significativos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- American Standard Test Method (ASTM), 1994. D 143 – 94 “Standard Test Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber”.
- American Standard Test Method (ASTM), 1997. D 3507 – 97 “Standard Test Methods for penetration of preservatives in wood and for differentiating between Heartwood and Sapwood”.
- American Wood Preservers Association P5 – 05 (2005). Standard for waterborne preservatives.
- Baeza, M.; Briones, R.; Hernández, G., 2002. Retención mínima de sales CCA en madera de pino radiata que protege del ataque de la termita subterránea. *Revista Madera Ciencia y Tecnología* 2(1): 67-85.
- Boone, R.; Winandy, J.; Bendtsen, B., 1985. A technique for simulating lumber drying using small clear specimens. *Forest Products Journal* 35 (11/12):49-51.
- Cai, Z.; Bradtnueller, J.; Hunt, M.; Fridley, K.; Rosowsky, D., 1996. Fatigue behavior of OSB in shear. *Forest Products Journal* 46 (10):81-86.
- CONAMA, 2000. Guía para el control y prevención de la contaminación industrial, rubro aserraderos y procesos de la madera.
- CSI. Chemical Specialties, INC., 2002. ACQ Type D. Technical information.
- Labarthe, E., 2005. Efecto de la tasa de crecimiento en las propiedades mecánicas de Lenga en un renoval en tierra del fuego. Memoria de Título - U de Chile.
- Montes, P.; Peredo, H.; Lanfranco, D.; Ide, S.; Dolz, H., 2001. Una revisión de los productos alternativos al pentaclorofenato de sodio y bromuro de metilo utilizados en el sector forestal. *Revista Bosque* 22(1): 85-93.
- NDS, 1997. National design specification for wood construction. American Forest & Paper Association. American Wood Council.
- Ossa, C., 1996. Incidencia del secado a alta temperatura en algunas propiedades físico-mecánicas de Madera juvenil de *Pinus radiata* D. Don. Memoria Ingeniero Forestal, U Chile.
- Reyes, L.; Rose, M.; Fuentealba, A., 2000. Efecto de la mezcla de sal CCA y un retardante del fuego en la resistencia mecánica de la madera de pino radiata. *Revista Madera Ciencia y Tecnología* 2(1): 67-85.
- Slahor, J.; Hassler, C.; Dawson-Andoh, B.; 2001. The durability of Yellow-Poplar and Red Maple treated with ACQ-B. Documento técnico.
- Tame, N.; Duglogorski, B.; Kennedy, E., 2005. PCDD/F formation in flaming combustion, smoldering, and oxidative pyrolysis of ecofriendly treated wood. *Proceedings of the Combustion Institute*. Volumen 30, Issue 1, January 2005. Pages 1237 – 1243.
- Temiz, A.; Yildiz, U.; Nilsson T., 2006. Comparison of copper emission rates from wood treated with different preservatives to the environment. *Building and Environment* 41(7):910-914.

- USDA Forest Service (Forest Products Laboratory. GTR-113.), 1999. Wood Handbook – Capítulo Wood as an engineering material.
- Winandy, J., 1988. Properties of treated wood. Resumen ejecutivo de la 43 reunión anual, Forest Products Research Society.
- Winandy, J., 1995. Effect of waterborne preservative treatment on mechanical properties: a review. Documento proveniente de la novena primera reunión anual de la AWPA, 1995. New York.
- Winandy, J., 1996. Effects of Treatment, Incising, and Drying on Mechanical Properties of Timber. Forest Products Laboratory, USDA Forest Service.
- Yildiz, U.; Temiz, A.; Gezer, E.; Yildiz, S., 2004. Effects of the wood preservatives on mechanical properties of yellow pine (*Pinus sylvestris* L.). Building and Environment 39: 1071-1075.

6. ANEXOS

Anexo N° 1: Efecto del tipo de secado en el MOE

Secado	CH (%)	Densidad (g/cm ³)	Prom. MOE (Kg/cm ²)	Desv. Est. MOE (Kg/cm ²)	C.V. (%)	Preservado V/S Control
Aire	13,0	0,50	85483,9	16817,8	19,7%	
Horno	12,8	0,50	84443,3	17659,8	20,9%	-1,2%

Anexo N° 2: Efecto del nivel de concentración en el MOE

Nivel Con. (kg/m ³)	N° Obs.	CH (%)	Densidad (g/cm ³)	Prom. MOE (Kg/cm ²)	Desv. Est. MOE (Kg/cm ²)	C.V. (%)	Preservado V/S Control
0,0	30	12,4	0,50	79292,9	15813,2	19,9%	
4,0	30	13,4	0,50	85594,7	18988,6	22,2%	7,9%
6,4	30	13,1	0,50	88180,2	16302,8	18,5%	11,2%
9,6	30	12,8	0,51	87262,2	16337,3	18,7%	10,1%
12,8	30	13,2	0,51	81870,0	18500,6	22,6%	3,3%
16,0	30	12,3	0,52	87581,4	16565,1	18,9%	10,5%
Promedio grupos impregnados				86097,7	17338,9	20,1%	8,6%

Anexo N° 3: Efecto del tipo de secado en el MOR

Secado	CH (%)	Densidad (g/cm ³)	Prom. MOR (Kg/cm ²)	Desv. Est. MOR (Kg/cm ²)	C.V. (%)	Preservado V/S Control
Aire	13,0	0,50	764,1	114,4	15%	
Horno	12,8	0,50	742,5	102,4	14%	-2,8%

Anexo N° 4: Efecto del nivel de concentración en el MOR

Nivel Con. (kg/m ³)	N° Obs.	CH (%)	Densidad (g/cm ³)	Prom. MOR (Kg/cm ²)	Desv. Est. MOR (Kg/cm ²)	C.V. (%)	Preservado V/S Control	Prom. Carga Rupt (kg)
0,0	30	12,4	0,50	735,1	107,9	14,7%		224,3
4,0	30	13,4	0,50	746,5	100,2	13,4%	1,6%	227,5
6,4	30	13,1	0,50	765,3	103,7	13,6%	4,1%	234,7
9,6	30	12,8	0,51	761,9	112,8	14,8%	3,7%	233,6
12,8	30	13,2	0,51	758,0	128,1	16,9%	3,1%	235,3
16,0	30	12,3	0,52	752,8	104,3	13,9%	2,4%	233,5
Promedio grupos impregnados				756,9	109,8	14,5%	3,0%	

Anexo N° 5: Efecto del tipo de secado en el WML

Secado	CH (%)	Densidad (g/cm ³)	Prom. WML (Kg*cm/cm ³)	Desv. Est. WML (Kg*cm/cm ³)	C.V. (%)	Preservado V/S Control
Aire	13,0	0,50	0,3871	0,0791	20%	
Horno	12,8	0,50	0,3710	0,0697	19%	-4,2%

Anexo N° 6: Efecto del nivel de concentración en el WML

Nivel Con. (kg/m ³)	N° Obs.	CH (%)	Densidad (g/cm ³)	Prom. WML (Kg*cm/cm ³)	Desv. Est. WML (Kg*cm/cm ³)	C.V. (%)	Preservado V/S Control
0,0	30	12,4	0,50	0,3845	0,0724	18,8%	
4,0	30	13,4	0,50	0,3695	0,0654	17,7%	-3,9%
6,4	30	13,1	0,50	0,3750	0,0656	17,5%	-2,5%
9,6	30	12,8	0,51	0,3772	0,0763	20,2%	-1,9%
12,8	30	13,2	0,51	0,3981	0,0841	21,1%	3,5%
16,0	30	12,3	0,52	0,3700	0,0845	22,8%	-3,8%
Promedio grupos impregnados				0,3781	0,0752	19,9%	-1,7%

Anexo N° 7: Equipo para la impregnación de la madera.



Anexo N° 8: Cámara de secado



Anexo N° 9: Máquina Universal Instron



Anexo N° 10: Probetas de corte radial – Madera de Pino radiata D. Don



Anexo N° 11: CD con datos mecánicos, y análisis realizados.