



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA MADERA

COMPORTAMIENTO DE LA MADERA DE RENOVAL DE COIHUE
(*Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst.) SOMETIDAS A PROGRAMAS DE
SECADO CONVENCIONAL MODIFICADOS POR LA
TECNICA DE *DRYING EFFORT*

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero de la Madera

JORGE ANDRÉS VELASCO PIZARRO

Prof. Guía: Sr. Misael Gutiérrez Dauré. Ing. de Ejecución Mecánico
M.Sc. en Ciencias y Tecnologías de la Madera

Prof. Guía: Sr. Alejandro Bozo González. Ingeniero Forestal
Magíster en Ciencias Forestales
Ph. D. in Civil Engineering

Santiago, Chile

2009

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA MADERA

COMPORTAMIENTO DE LA MADERA DE RENOVAL DE COIHUE
(*Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst.) SOMETIDAS A PROGRAMAS DE
SECADO CONVENCIONAL MODIFICADOS POR LA
TECNICA DE *DRYING EFFORT*

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero de la Madera

JORGE ÁNDRES VELASCO PIZARRO

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Misael Gutiérrez Dauré	7,0
Prof. Guia Sr. Alejandro Bozo Gonzalez	6,9
Prof. Consejero Sr. José T. Karsulovic Carrasco	6,8
Prof. Consejero Sr. Luís A. León Gamboa	7,0

*A mis padres
y a mi niña Pilar*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a:

Mis profesores guía Sr. Misael Gutierrez y Sr. Alejandro Bozo por la disposición de enseñarme y ayudarme a terminar este trabajo de memoria de título.

Mis profesores consejeros Sr. José T. Karsulovic y Sr. Luís A. León por la disposición ayudarme y aconsejarme para mejorar esta memoria de título.

El Sr. Luís Espina y al Sr. Patricio Vergara por toda la ayuda prestada en el Centro Tecnológico de la Madera

Sr. Aldo Cisternas por ayudarme con todo lo referido a análisis estadístico, además de la oportunidad que me brindó en mi actual trabajo junto a él.

Mis padres los que dieron todo por mí para tener una educación digna y lograr salir adelante en la vida. Una mención honrosa a mi padre Sr. Jorge Velasco O. por acompañarme todos los Sábados y Domingos que duró la experimentación para llevar a cabo este trabajo y a mi madre la Sra. Silvia Pizarro R. nose como agradecerle lo que ha dado por mí día a día, simplemente gracias.

La familia Cuevas Silva, en especial a Pilar Cuevas, por el apoyo entregado, la compañía y los consejos que me dieron en momentos difíciles.

Todos mis compañeros de Ingeniería de la Madera en especial a Edgard Nattes, Felipe Muñoz y Vicente Vargas que me ayudaron a tomar mediciones o preparar cargas para secar. Además de mis amigos Pablo y Christian De la Fuente y familia por todo el apoyo prestado durante estos años de amistad

Sr. Luís Frías que fue como un padre para todos los alumnos de Ingeniería de la Madera, su disposición y carisma lo hicieron una persona única; gente como él se conoce una vez e la vida, gracias “Luchito” por todo, nunca te olvidare.

A todos ellos muchas gracias que la vida los premie con bendiciones y felicidad a cada momento y a sus familias.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	
ABSTRACT	
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	5
2.1 Material experimental	5
2.2 Equipos e instrumentos utilizados	5
2.3 Método experimental	7
2.3.1 Descripción del experimento básico	7
2.3.2 Selección de las muestras, mediciones preliminares y encastillado de piezas de una carga.	7
2.3.3 Programas de secado y secado propiamente tal	9
2.3.4 Control de tensiones internas, contenido de humedad final y su distribución	11
2.3.5 Determinación de defectos después del proceso de secado y recuperación del colapso.....	12
2.3.6 Evaluación de los resultados	13
2.3.6.1 Método estadístico de evaluación de resultados	13
2.3.6.2 Evaluación de la calidad según norma	14
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
3.1 Análisis estadístico	15
3.1.1 Acanaladura.....	15
3.1.2 Encorvadura	16
3.1.3 Arqueadura	17
3.1.4 Torcedura	18
3.1.5 Grietas internas.....	19
3.1.6 Grietas superficiales	20
3.1.7 Rajaduras	21
3.2 Contenido de humedad de la madera	21
3.3 Tiempos de secado, recuperación de colapso y tensiones internas	24
3.4 Alabeos y grietas producidas en el secado	30
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
5. BIBLIOGRAFÍA	41
APÉNDICE A	43
APÉNDICE B	46
APÉNDICE C	50
APÉNDICE D	52
APÉNDICE E	56
ANEXO I	59
ANEXO II	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Cámara de secado a escala piloto	6
Figura 2.2: Muestras testigos y probetas de obtención del contenido de humedad inicial	8
Figura 3.1: Media e intervalo de confianza al 95% para acanaladura	16
Figura 3.2: Media e intervalo de confianza al 95% para encorvadura.....	17
Figura 3.3: Media e intervalo de confianza al 95% para arqueadura.....	18
Figura 3.4: Media e intervalo de confianza al 95% para torcedura	19
Figura 3.5: Media e intervalo de confianza al 95% para Grietas internas	20
Figura 3.6: Media e intervalo de confianza al 95% para Grietas superficiales.....	20
Figura 3.7: Media e intervalo de confianza al 95% para rajaduras.....	21
Figura 3.8: Curva de secado para el programa A.....	25
Figura 3.9: Curva de secado para programa A modificado	25
Figura 3.10: Curva de secado para programa de secado B	26
Figura 3.11: Curva de secado para progre de secado B modificado.....	26
Figura 3.12: Curva de secado para programa de secado B repetido.....	26
Figura 3.13: Tensiones en las probetas tenedor antes y después del acondicionado	29
Figura 3.14: Gráfica de frecuencia de intensidad de acanaladura para los distintos programas de secado	33
Figura 3.15: Gráfica de frecuencia de intensidad de encorvadura para los distintos programas de secado	34
Figura 3.16: Gráfica de frecuencia de intensidad de Arqueadura para los distintos programas de secado	35
Figura 3.17: Gráfica de frecuencia de intensidad de torcedura para los distintos programas de secado	35

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Factores y niveles para el análisis estadístico	7
Cuadro 2.2: Programa de secado A tentativo.....	9
Cuadro 2.3: Programa de secado A modificado (A.M)	10
Cuadro 2.4: Programa de secado B tentativo	10
Cuadro 2.5: Programa de secado B modificado (B.M).....	10
Cuadro 3.1: Análisis de varianza para acanaladura	15
Cuadro 3.2: Test de Duncan para acanaladura.....	15
Cuadro 3.3: Análisis de varianza para encorvadura.....	16
Cuadro 3.4: Análisis de varianza para arqueadura.....	17
Cuadro 3.5: Test de Duncan para arqueadura	17
Cuadro 3.6: Análisis de varianza para torcedura	18
Cuadro 3.7: Test de Duncan para torcedura.....	18
Cuadro 3.8: Análisis de varianza para grietas internas	19
Cuadro 3.9: Análisis de varianza para grietas superficiales.....	20
Cuadro 3.10: Análisis de varianza para rajaduras	21
Cuadro 3.11: Contenido de humedad inicial y final promedio según programa de secado.	21
Cuadro 3.12: Resumen gradiente de humedad para los cinco programas de secado	23
Cuadro 3.13: Tiempos de secado en horas según etapa y programa de secado	24
Cuadro 3.14: Tasas de secado para programa A y programa de secado A modificado	27
Cuadro 3.15: Tasas de secado para programa B, programa B modificado y B repetido	27
Cuadro 3.16: Resultados recuperación de colapso para cada uno de los programas de secado	28
Cuadro 3.17: Valores de deformación final promedio y máxima según programa de secado [mm].....	31
Cuadro 3.18: Valores de deformación final promedio y máxima estimada según programa de secado [mm]	31
Cuadro 3.19: Intensidad de deformaciones promedio según programa de secado	32
Cuadro 3.20: Intensidad de deformaciones máxima según programa de secado.....	32
Cuadro 3.21: Índices de calidad según programa de secado.....	36
Cuadro 3.22: Presencia de ruptura de tejido en las piezas de madera [%] según programa de secado.....	37
Cuadro 3.23: Cantidad de ruptura de tejido leñoso por pieza de madera según programa de secado.....	38
Cuadro A.1: Obtención del esfuerzo de secado para el programa de secado A tentativo....	44
Cuadro A.2: Obtención del esfuerzo de secado para el programa de secado B tentativo....	45
Cuadro A.3: Utilización de los esfuerzo de secado para obtener el programa de secado A modificado.....	45
Cuadro A.4: Utilización de los esfuerzo de secado para obtener el programa de secado B modificado.....	45
Cuadro B.1: Valores utilizados según programa para el defecto de acanaladura	47
Cuadro B.2: Valores utilizados según programa para el defecto encorvadura	47
Cuadro B.3: Valores utilizados según programa para el defecto arqueadura	48
Cuadro B.4: Valores utilizados según programa para el defecto torcedura.....	48
Cuadro B.5: Valores utilizados según programa para el defecto grietas internas.....	48

Cuadro B.6: Valores utilizados según programa para el defecto grietas superficiales	49
Cuadro B.7: Valores utilizados según programa para el defecto rajadura.....	49
Cuadro C.1: Porcentaje de error de la estimación de contenido de humedad final por medio de las muestras de control.	51
Cuadro D.1: Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio para el programa de secado A.	53
Cuadro D.2: Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio para el programa de secado A modificado.....	54
Cuadro D.3: Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio para el programa de secado B.	54
Cuadro D.4: Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio para el programa de secado B modificado.....	55
Cuadro D.5: Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio para el programa de secado B repetido.....	55
Cuadro E.1: Resultados de las distintas contracciones medidas a través del ciclo de secado	58
Cuadro I.1: Desviación admisible del CH final promedio respecto del CH final esperado.	60
Cuadro I.2: Desviación admisible del gradiente de CH en el espesor de la pieza	60
Cuadro I.3: Especificaciones de flecha máxima [mm] para acanaladura	60
Cuadro I.4: Especificaciones de flecha máxima [mm] para distintas intensidades de encorvadura según ancho de la pieza [mm] y un largo de 2,44 m	60
Cuadro I.5: Especificaciones de flecha máxima [mm] para distintas intensidades de arqueadura según espesor de la pieza [mm] y un largo de 2,44 m.....	61
Cuadro I.6: Especificaciones de flecha máxima [mm] para distintas intensidades de torcedura según espesor de la pieza [mm] y un largo de 2,44 m.	61
Cuadro I.7: Valores admisibles [mm] para el índice de calidad de secado, según nivel de deformación, para piezas de madera con medidas de 1" x 5" x 1,8 m.....	61
Cuadro I.8: Atributos de calidad de secado según índice de calidad	62
Cuadro II.1: Presiones de vapor de agua [mili bar], según temperatura [°F], dentro de una cámara de secado.....	64

RESUMEN

Este estudio analizó el comportamiento de la madera de renoval de Coihue (*Nothofagus dombeyi* (Mirb) Oerst), sometida a proceso de secado convencional, cuya finalidad fue obtener madera seca a un 8% de contenido de humedad. La variable a analizar en este trabajo fue el comportamiento de distintos programas de secado sobre la madera de Coihue. Estos programas de secado corresponden a dos programas tentativos creados en base a la experiencia en secado de la madera y dos programas modificados de los dos tentativos, mediante la técnica de esfuerzos de secado (Drying effort) propuesto por Bramahall (1975). Basado en la disminución del tiempo de secado de cada etapa progresiva del programa de secado, y a la vez, aumentando la diferencia psicrométrica, manteniendo los esfuerzo de secado constante. Este trabajo fue financiado por el Proyecto INNOVA CORFO, Innovación Empresarial IE-2, Código 205-4414; adjudicado a la empresa Simple S.A “Desarrollo en Chile de una tecnología de elaboración de muebles plegables usando madera de poco valor comercial de bosque nativo, bajo estándares de certificación ambiental internacional y destinados a la exportación”

Como material de ensayo se seleccionaron trozas de madera de Coihue provenientes de la localidad de Curarrehue (IX Región), con clases diamétricas variables, de estas se obtuvo piezas de ancho variable y largo de 1,8 m. con un espesor de 30 mm. La experimentación se desarrolló en el Centro Tecnológico de la madera, dependiente a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile

La evaluación de los resultados se realizó a través de un Diseño Completamente Aleatorio de efectos fijos (DCA I) para las variables de ensayo defectos y grietas. Además se incluyó un análisis basado en la Norma Chilena NCh 993 y un índice de calidad del secado para los defectos, además de clasificar el contenido de humedad final y la gradiente de humedad, basado en las normas de la Comisión Europea. Comparación de tiempos de secado, recuperación de colapso y tensiones internas para los distintos programas de secado. las grietas fueron comparadas de forma de presencia de este defecto en la madera y cuantas madera con este defecto se presenta en cada carga de secado. El programa con menores defectos fue elegido para realizar una repetición con una mayor cantidad de madera.

Para la madera de renoval de Coihue se selecciono un programa basado en altas humedades relativas del ambiente (programa de secado B), el cual presentó los mejores resultados de Alabeos y buenos resultados en colapso de la madera y un buen tiempo de secado; pero este programa no es el que presenta el menor tiempo de secado y tampoco los mejores resultados en las grietas, estos resultados fueron presente en el programa de secado A modificado en el caso del tiempo de secado, y el programa de secado B modificado para el caso de las grietas en la madera.

Palabras clave: Secado de la madera, Renoval de Coihue, Defecto de secado, Esfuerzo de secado.

ABSTRACT

This study analyzed the conduct of wood regrowth of Coihue (*Nothofagus dombeyi* (Mirb) Oerst) subjected to conventional drying process, which idea was to get dry wood to 8% moisture content. The variable in this study was to analyze the response of various programs on the drying of wood Coihue. These programs fall into two drying tentative programs created on the basis of experience in drying of wood and modified two of the two attempts, through the efforts of technical Drying labour proposed by Bramahall (1975). Based on the decrease of drying time for each stage of the program of gradual drying, while increasing the difference psychrometers, consistency the drying constant effort. This work is funded by the Project INNOVA CORFO, Business Innovation IE-2, Code 205-4414; awarded by the Simple SA "Development in Chile of a processing technology using wood folding furniture little commercial value of forest under international environmental standards and certification for export "

As investigation material was selected Coihue logs of wood from the town of Curarrehue (Region IX), with variable diameter classes, was obtained from these pieces of variable width and length 1.8 m. with a thickness of 30 mm. The experiment was conducted in the Technology Center of the Timber, adjacent to the Faculty of Forestry, University of Chile

The evaluation of the results is through a completely unexpected design of fixed effects (DCA I) for the variables testing for defects and cracks. It also includes an analysis based on Chilean standard NCh 993 and a quality index for drying defects, in addition to classifying the final moisture content and moisture gradient, based on the code of the European Commission. Comparison of drying times, the downfall and recovery of internal weight for the various programs of drying. The flaw was compared by the presence of this defect in the wood and any wood with this defect occurs in drying each load. Minor defect with the program was chosen for a repetition with a larger amount of wood.

For wood from regrowth Coihue you select a program based on high relative humidity environment (dry program B), which presented the best results of pitch and good results in collapse of the timber and a good drying time, but this program is not the one that presents the shortest drying time and also the best results in the cracks, these findings were present in the dry program to modify the case of drying time, ed B for the case of cracks in the wood.

Keywords: drying of wood, regrowth of Coihue, Defect drying, drying effort.

1. INTRODUCCIÓN

El Coihue (*Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst.) es una especie endémica de los bosques subantárticos. En Chile crece desde la provincia de Colchagua en la VI región, hasta la provincia de Aysén en la XI región. La amplia distribución se extiende por alrededor de 1500 km. a través de siete regiones administrativas, estando presente en la Cordillera de los Andes en forma casi ininterrumpida desde los 34° 31' sur hasta los 48° de latitud sur (Rodríguez *et al.*, 1983; CIREN – INFOR, 1994).

La madera de Coihue, especie nativa, de gran interés comercial e industrial; esta madera se ha utilizado en la manufactura de muebles y otros fines nobles. Este recurso es cada día más escaso, alejado de los centros industriales y en lugares de difícil acceso; esto favorece a la madera proveniente de bosques de segundo crecimiento o renoval. Un renoval corresponde a la regeneración natural de las masas forestales, tanto por tocón como por semilla; Chile cuenta hoy en día con una superficie de 15,6 millones de hectáreas de bosque, de las cuales 13,4 son de bosque nativo. De estas, 3,6 millones de hectáreas son renovales, bosques jóvenes con un gran potencial de crecimiento (CONAF, 2007).

En Chile se han realizados escasos trabajos sobre madera de renovales de Coihue, existiendo una limitada información sobre esta materia prima, pero sí se cuenta con una mayor gama de información sobre la madera de renovales de otro tipo de especies como Roble, Raulí, Lenga y algunos estudios sobre madera de renoval de Canelo. Una de las pocas limitante de estas maderas como renoval es su color, el cual es débilmente coloreado, por lo que no existe un interés en el mercado por productos de mayor grado de elaboración. Una de las ventajas de la madera nativa de renovales es que presenta un mayor rendimiento volumétrico en los procesos de aserrado que la madera madura, entre un 10 y un 15 % superior, debido a una baja presencia de pudrición y de ataque de otros agentes de biodeterioro, además de un bajo costo como materia prima. Por sus características físicas, mecánicas y bajo costo sumados a un rápido crecimiento, las maderas de renovales podrían tener un potencial uso dentro de la industria. Es por eso que se hace cada vez más necesario conocer mejor este material, caracterizarlo tanto en sus propiedades físicas, mecánicas y anatómicas, como en su elaboración y procesamiento.

Uno de los procesos más importantes y el primero que se realiza, posterior al aserrado de las trozas, dentro de la industria de la madera corresponde al secado, puesto que este proceso mejora las propiedades mecánicas, la estabilidad dimensional de la madera, terminación superficial, el uso de recubrimientos y adhesivos. La operación o conducción de un proceso de secado está ligado al programa que se aplique, el cual es dependiente de la especie, espesor, contenido de humedad inicial y final, y factores relacionados con las características técnicas del equipo de secado. Estos programas se logran solamente por medio de la investigación y la experiencia.

La tecnología del secado, estudia el procedimiento de eliminar el agua de la madera, de forma de obtener un producto sin defectos ni alteraciones que disminuyan su valor en el menor tiempo posible, y que pueda seguir transformándose sin causar problemas derivados del secado (Vignote y Jiménez, 2000).

La humedad de la madera afecta numerosos procesos de transformación y elaboración de ésta. Así a modo de ejemplo el agua de la madera se interpone entre la madera y la cola o barniz, dificultando la realización de estos procesos. Pero más importante, que esta acción es el hecho de que el valor de contenido de humedad de la madera, afecta sus dimensiones y estabilidad dimensional bajo el punto de saturación de las fibras (Vignote y Jiménez, 2000).

Dentro de las distintas técnicas de secado de la madera, se conoce una técnica denominada secado convencional que es la más profusamente utilizada dentro del secado artificial. Sin limitaciones en cuanto a las especies a secar, presenta gran flexibilidad de cambios de las variables del secado (temperatura y humedad relativa). La temperatura a la cual funciona este tipo de secado no supera los 95 °C, los espesores usuales para este secado son de 25mm, 38 mm, y 50 mm. (Gutiérrez, 1995).

Según Gutiérrez (1995) dentro del secado convencional se reconocen cuatro etapas, las cuales son:

- **Periodo preparatorio de calentamientos y vaporizado inicial:** Todo el conjunto, secador y madera, es llevado a las condiciones iniciales de temperatura, realizándose un vaporizado, cuya duración depende de la especie, contenido de humedad y espesor.
- **Secado, propiamente tal:** La madera es expuesta a una secuencia de condiciones variables de temperatura y humedad relativa denominada programa de secado. Estos programas dependen de la especie, espesor y características del secador. Se definen mediante trabajos de investigación y experiencias en la operación de las plantas de secado. Dentro de una misma especie, pueden variar las condiciones principalmente en función de la edad y lugar de procedencia.
- **Igualado:** Consiste en mantener toda la carga bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad relativa para que el contenido de humedad de equilibrio sea igual al contenido de humedad final. La duración de este proceso es variable y depende de la especie y contenido de humedad final. Puede fluctuar de 4 horas a 18 horas.

- **Acondicionamiento de la carga:** En el secado se desarrollan esfuerzos o tensiones internas. En la primera etapa del secado la capa exterior de la madera alcanza más rápidamente el punto de saturación de la fibra que la parte interna de la madera, originando que la capa externa se contrae generando esfuerzos de tracción y con ello en la capa interna esfuerzos de compresión. En la segunda etapa del secado la capa interna de la madera alcanza el punto de saturación de las fibras y comienza entonces la contracción de dicha zona. Mientras la contracción se incrementa, las sollicitaciones de tracción de la periferia se reducen y se invierten los esfuerzos, es decir, la capa exterior queda sometida a un esfuerzo de compresión, mientras la externa queda sometida a esfuerzos de tracción (Ramírez, 2004).

Estas etapas son aplicadas en los llamados programas de secado, los cuales se basan en el contenido de humedad de la madera y en el tiempo de secado. Este tipo de programa proporciona un buen control y el máximo de seguridad en el proceso de secado y representa un manejo aproximado de las tensiones que se desarrollan dentro de una pieza mientras ella se seca. Los programas que se basan en el tiempo se obtienen después de adquirir bastante experiencia y antecedentes de secado de una partida específica de madera; sin embargo ambos programas variarían según la especie, espesor, edad, proporción albura y duramen, tipo de grano y contenido de humedad desde el momento de cargar la cámara de secado y según contenido de humedad final que se desee (Mancilla, 2000).

De acuerdo a Bramahall (1975), existe una forma para modificar un programa de secado el cual lleva por nombre Drying Effort, (método de los esfuerzos de secado). Este método tiene las siguientes características:

- Permite modificar el programa de secado en base a dos factores; el tiempo de secado en cada etapa y la diferencia de presión de vapor saturado, para las temperaturas del bulbo seco y bulbo húmedo. El producto entre estos dos valores corresponde al esfuerzo de secado (Ramírez, 2004).
- Es necesario conocer los resultados completos de un programa de secado base para su posterior modificación. Este método no entrega información del grado de defecto que pueda generarse como consecuencia de su aplicación (Bramahall, 1975; Ramírez, 2004).
- Mediante la técnica de Drying effort es posible determinar el tiempo de secado deseado, acortar un tiempo determinado o en su efecto acelerar un proceso en una etapa dada.
- El valor del esfuerzo de secado es un indicador del total de energía necesaria para llevar un contenido de humedad de un conocido tipo de madera de un valor a otro.

Dentro del secado unas de las variables a manejar son los denominados defectos del secado los cuales corresponden a alabeos (acanaladura, encorvadura, arqueadura y torcedura), grietas internas, grietas superficiales y rajaduras, la reducción de estos defectos a un mínimo, es el objetivo principal de un proceso, conjuntamente con un tiempo mínimo de secado.

Esta Memoria de título fue financiada por el Proyecto INNOVA CORFO, Innovación Empresarial IE-2, Código 205-4414; adjudicado por la empresa Simple S.A “Desarrollo en Chile de una tecnología de elaboración de muebles plegables usando madera de poco valor comercial de bosque nativo, bajo estándares de certificación ambiental internacional y destinados a la exportación”, además del aporte realizado por la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile, específicamente el Departamento de Ingeniería de la Madera y su Centro Tecnológico de la Madera (CTM)

El objetivo general de este trabajo corresponde a evaluar el comportamiento de la madera de renoval de Coihue de 30 mm. de espesor, según cuatro programas de secado convencional; dos propuestos y dos modificados aplicando la técnica de Drying Effort.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Comparar el contenido de humedad final y la gradiente de humedad generada en cada proceso de secado
- Analizar los tiempos de secado y defectos generados en los procesos de secado.
- Determinar el tiempo de acondicionamiento para cada caso.
- Determinar el tiempo de reacondicionado y recuperación del colapso para cada caso.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material experimental

El material experimental lo conformaron las piezas que se obtuvieron después de aserrar trozas de renoval de Coihue. Estas trozas provinieron de la localidad de Curarrehue, Novena Región de la Araucanía, la clase diamétrica está comprendida entre 25 cm. y 35 cm. Esta madera corresponde a madera proveniente de raleos y es utilizada como leña en la localidad, siendo una madera de muy baja calidad.

En el aserrado se obtuvieron piezas de un espesor de 30 mm, y en condiciones verdes y con anchos variables entre 7 y 15 cm.

La última etapa de preparación del material experimental consistió en el trozado de cada pieza para dejarlas a 1,8 m de largo, medida limitada por el largo de la cámara de secado experimental.

2.2 Equipos e instrumentos utilizados

- Cámara experimental de secado de dimensiones internas 1,35 m ancho, 1,8 m largo y 1,3 m de alto. La velocidad del flujo de aire corresponde a 2,5 m/s con dos ventiladores axiales reversibles. El flujo de calor se obtiene a través de seis calefactores y el vapor es suministrado por un recipiente con agua que posee dos calefactores eléctricos que producen la humidificación. La cámara posee cuatro ventilas (dos de admisión de aire externo y dos de expulsión del aire interno saturado de vapor de agua). Para controlar la temperatura y humedad relativa fueron controlados por un sistema semiautomático de marca FOXBORO de tipo neumático.



Figura 2.1: Cámara de secado a escala piloto

- Sierra circular: marca WARKIN BURSGREEN
- Sierra huincha de mesa marca POWERPRO
- Balanza digital, con una capacidad de 300 g y precisión de 0,01 g.
- Balanza eléctrica de capacidad 12 Kg. y una precisión de 1g.
- Estufa eléctrica a una temperatura de $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Pie de metro de precisión de 0,05 mm.
- Xilohigrómetro marca DELMHORST, modelo RC – ID 1185

2.3 Método experimental

2.3.1 Descripción del experimento básico

El experimento tuvo por objetivo evaluar el efecto de cuatro distintos programas de secado sobre la madera aserrada de Renoval de Coihue.

Se midieron siete tipos de defectos por causas del proceso de secado. Estos son arqueadura, acanaladura, torcedura, encorvadura, rajadura, grietas superficiales y grietas internas.

El experimento básico somete al material experimental a 4 combinaciones de tratamiento.

Cuadro 2.1: Factores y niveles para el análisis estadístico

Factor	Niveles
Especie	1 (Renoval de Coihue)
Espesor	1 (30 mm)
Programa	4

El programa con los mejores resultados será repetido con una mayor cantidad de madera; esta experimentación no fue considerada para el análisis estadístico

2.3.2 Selección de las muestras, mediciones preliminares y encastillado de piezas de una carga.

Se seleccionaron dos tipos de muestras. La primera en un número de 12 fueron elegidas por cada carga dando lugar a un tratamiento o programa de secado.

El segundo tipo de muestras correspondió a las necesarias para llevar a cabo el control del contenido de humedad de la carga durante el proceso de secado, fundamental para la conducción del proceso bajo un programa de secado. Se seleccionaron en cada carga tres piezas. Fueron piezas representativas de la carga. Cada carga tuvo en total 15 piezas (tres muestras testigos y 12 piezas en proceso); Para la repetición del mejor programa se consideraron cinco muestras testigos, para el control de secado.

Las muestras testigos para el control del proceso de secado se obtuvieron de la parte central de la pieza seleccionada; además de dos probetas de 1 cm de espesor obtenidas de los extremos y destinadas a determinar el contenido de humedad inicial de cada muestra, cuyo promedio representa el contenido de humedad de toda la carga.

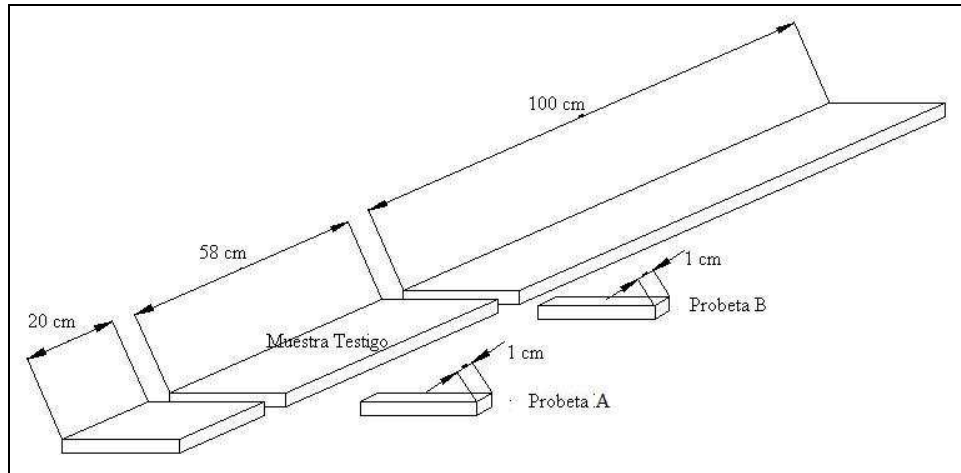


Figura 2.2: Muestras testigos y probetas de obtención del contenido de humedad inicial

En cada una de las muestras testigos se marcaron cuatro puntos seleccionados al azar y se midió el espesor, para la determinación de recuperación de colapso.

Las piezas fueron ubicadas en una superficie plana para verificar la existencia de deformaciones antes del proceso de secado; si existiesen, fueron medidas para su posterior consideración. Lo mismo se realizó con las grietas y rajaduras. Además se pintaron los extremos con la finalidad de evitar que aparezcan rajaduras y pérdida acelerada de humedad por los extremos durante el secado.

Por su parte, las probetas (A y B) que se obtuvieron por cada muestra testigo de control, se utilizaron para calcular el contenido de humedad inicial de la carga de la madera, estipulada en la Norma Chilena NCh 176 parte 1.

Con el dato de contenido de humedad inicial promedio de cada muestra, se determinó el peso seco de las muestras de control. Para esto se pesaron cada muestra obteniendo su peso húmedo.

El peso seco se obtendrá de la siguiente formula:

$$P_o = \frac{P_g}{1 + \frac{CH}{100}}$$

Donde: Po: peso anhidro de la muestra [g]
 Pg: peso verde de la muestra [g]
 CH: contenido de humedad obtenido en probetas [%]

De esta manera se pudo estimar el contenido de humedad en cualquier momento para el control y correcta ejecución de los programas de secado.

Al concluir la preparación de las piezas de una carga se procedió a armar el castillo. Este consto de 15 piezas distribuidas en una sola columna. Los separadores correspondieron a madera de pino con dimensiones de 50 mm de ancho y 25 mm de espesor, separados a una distancia de 43 cm entre si. Para la repetición del mejor programa se utilizo 18 piezas y ubicadas en tres columnas para la carga, además de cinco muestras testigos para control; las muestras testigos de control serán ubicadas de forma al azar dentro de la carga de secado.

2.3.3 Programas de secado y secado propiamente tal

Se realizaron cinco procesos de secado, correspondiente a la aplicación dos procesos propuestos y dos modificados según los esfuerzos de secado (Técnica Drying Effort). Y uno de repetición del mejor programa realizado.

Se presentan a continuación los programas propuestos (A y B) y sus respectivas modificaciones según Drying Effort.

Cuadro 2.2: Programa de secado A tentativo

CH madera	T° bs [°C]	T° bh [°C]	HR [%]	CH eq [%]	Potencia de secado
Vaporizado Inicial	45	42	83	17	-----
Verde – 60	45	43	88	20	3,00
60 – 40	45	42	83	17	2,35
40 – 20	50	46	78	15	1,33
20 – 15	55	50,5	76	13	1,15
15 – 10	55	46	59	9	1,11
10 – 8	60	44	40	6	1,33

Cuadro 2.3: Programa de secado A modificado (A.M)^{*}

CH madera	Tbs [°C]	Tbh [°C]	HR [%]	CH eq [%]	Potencia de secado
Vaporizado Inicial	45	42	83	17	-----
Verde – 60	45	43	88	20	3,00
60 – 40	45	41	78	15	2,67
40 – 20	50	45	75	13	1,54
20 – 15	55	49	72	11	1,36
Reacondicionado	84	83	96	22	-----
15 – 10	55	43	50	8	1,25
10 – 8	60	38	26	5	1,60

Cuadro 2.4: Programa de secado B tentativo

CH madera	Tbs [°C]	Tbh [°C]	HR [%]	CH eq [%]	Potencia de secado
Verde – 35	50	48	89	20	1,75
35 – 25	50	47	81	15	1,67
Reacondicionado	50	49	93	23	-----
25 – 15	50	42	62	10	1,50
15 – 8	50	31	21	4	2,00

Cuadro 2.5: Programa de secado B modificado (B.M)[†]

CH madera	Tbs [°C]	Tbh [°C]	HR [%]	CH eq [%]	Potencia de secado
Verde – 35	50	47	82	15	2,33
35 – 25	50	43	65	11	2,27
Reacondicionado	50	49	93	23	-----
25 – 15	50	37	43	7	2,14
15 – 8	50	31	21	4	2,00

Los cambios que se realizarán a los programas de secado tentativos A y B, vienen dado por los denominados esfuerzos de secado (Drying Effort), la siguiente formula define este valor de secado (Bramahall, 1975):

$$ES = [PVBS - PVBH] \times T$$

Donde: ES : Esfuerzo de secado [mbar x horas]
 PVBS : Presión de vapor de agua saturado en el bulbo seco [mbar]
 PVBH : Presión de vapor de agua saturado en el bulbo húmedo [mbar]
 T : Tiempo [horas]

* Ver apéndice A

† Ver Apéndice A

El proceso de secado propiamente tal comenzó con el calentamiento y vaporizado inicial de la madera, los cuales tuvieron una duración de 1 hora y 12 horas respectivamente. Por las altas temperaturas y altas humedades relativas solicitadas, se cerraron todas las ventilas de la cámara de secado para la saturación de la misma con vapor de agua.

La etapa de secado se llevo a cabo de acuerdo al programa de secado aplicado según los indicados en los cuadros 2.2 al 2.5. Los cambios de etapa se realizo cuando el contenido de humedad promedio de las muestras de control fue igual al límite inferior de humedad fijado en la etapa. La medición fue gravimétrica y realizada cada 24 horas.

El reacondicionamiento se aplicó en cuatro de los cinco programas de secado (el programa A excluye esta etapa). Este proceso comenzó cuando las muestras de control tengan un promedio de contenido de humedad de 18% y además cuando la muestra más húmeda se encuentre bajo el contenido de humedad de equilibrio de la etapa de reacondicionado, la duración de esta etapa fue de 6 horas.

Al momento de comenzar el reacondicionamiento se tomaron cuatro mediciones en espesor en los mismos cuatro puntos seleccionados y medidos con anterioridad y luego de las 6 horas se volvieron a medir para posteriormente cuantificar la recuperación de colapso que obtengan la madera con este vaporizado. La diferencia psicrométrica entre la temperatura del bulbo seco con el húmedo fue de uno, logrando una humedad relativa superior al 93%

El acondicionamiento final se realizó cuando el promedio de contenido de humedad de la muestras de control sea igual o inferior a 8%; para realizar el acondicionamiento se utilizo la temperatura del bulbo seco de la ultima etapa de secado con una depresión psicrométrica de cuatro. Esta etapa se realizó hasta que las tensiones internas fueron liberadas, basándose en la prueba de las probetas tenedor.

Tanto en el reacondicionamiento como en acondicionamiento final, las ventilas de la cámara de secado se mantuvieron totalmente cerradas, para la disminución de la humedad relativa de la cámara de secado

2.3.4 Control de tensiones internas, contenido de humedad final y su distribución

Las tensiones internas fueron controladas con las denominadas probetas tenedor y estas se obtuvieron periódicamente de las muestras de control, para esto se cortaron dos secciones por extremos de las muestras de 2,5 cm de largo. Antes de esto se realizó un despunte de la muestra de control para que las probetas tenedor fuesen representativas.

El contenido de humedad final de la carga fue determinado de dos formas según la procedencia de las muestras; la primera correspondió a probetas de 1 cm obtenidas de las muestras testigos, y la segunda correspondió a probetas de la misma medida pero de cada una de las piezas de madera; este proceso se llevo a cabo después de la cuantificación de los defectos de secado.

El gradiente de humedad se midió con un xilohigrómetro la humedad periférica y del centro de la pieza. Para esto se eligieron dos puntos al azar por pieza donde primeramente se midió la humedad periférica y posteriormente la humedad central, con estos datos se determinó la gradiente de humedad de la madera por programa de secado.

2.3.5 Determinación de defectos después del proceso de secado y recuperación del colapso

Para evaluar las deformaciones producidas durante el proceso de secado, se midieron las muestras antes y después del secado; estos defectos correspondieron a arqueadura, acanaladura, encorvadura y torcedura. Estas deformaciones se midieron según la norma NCh 993. EOf 72: Procedimientos y criterios de evaluación para la clasificación.

La medición de las grietas superficiales, grietas internas, y rajaduras fue cuantitativa y se realizó antes y después del proceso de secado; las grietas superficiales fueron consideradas para valores mayores o iguales a 8 cm de largo.

La recuperación del colapso se define como la razón entre de la diferencia de la contracción total y la contracción normal de la madera (contracción por colapso), y la contracción total. La contracción total se calculó desde verde hasta el contenido de humedad antes de aplicar el reacondicionamiento y la contracción normal se consideró desde las dimensiones verde al empezar el secado y las dimensiones al final del proceso de secado, Las contracciones fueron cuantificadas según la Norma Chilena NCh 176 parte 3: Determinación de la contracción radial y tangencial.

2.3.6 Evaluación de los resultados

2.3.6.1 Método estadístico de evaluación de resultados

Los valores de la variable respuesta se podrán representar por un diseño completamente aleatorio de efectos fijo (DCA del tipo 1) (Montgomery, 1991)

$$Y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \quad \text{donde : } i = [1,12] \\ j = 1, 2, 3, 4$$

- Y_{ij} : Respuesta de defecto para el *j-esimo* programa de secado en la *i-esima* replica
 μ : Promedio global (parámetro común)
 τ_j : Efecto principal causado por el *j-esimo* nivel de programa de secado sobre la variable de respuesta defecto en estudio
 ε_{ij} : Error experimental, asociado al *j-esimo* programa de secado en la *i-esima* replica

Se probó la hipótesis del efecto de los cuatro programas de secado sobre las piezas de madera Renoval de Coihue agrupadas en cuatro cargas (una por programa); la hipótesis nula es la que se presenta a continuación:

Ho: “No existe diferencia significativa entre las medias de los cuatro programas de secado para el defecto r de secado”, $r = 1, \dots, 7$

Ho: $\tau_j = \tau_j$ versus H1: $\exists \tau_j \neq \tau_j$ para todo $j = 1, 2, 3, 4$

El análisis estadístico, el cual se realizó para cada una de las variables a medir, consistió en un análisis de ANDEVA, con una probabilidad de error del 5 % (grado de significancia). Si la hipótesis nula se rechaza, se lleva a cabo un análisis de diferencia de medias o contrastes de DUNCAN (Montgomery, 1991).

Si los datos de un defecto r no cumplen con la normalidad o la homocedasticidad entre ellos, se transformaron aplicando logaritmo en base 10, para que cumplan con estas premisas.

2.3.6.2 Evaluación de la calidad según norma

Las desviaciones del contenido de humedad final promedio y del gradiente de humedad entre la superficie y centro de evaluación se clasificaron según estándares de la comisión de la comunidad Europea.

Las deformaciones (alabeos) se evaluaron sobre la base de la norma chilena NCh 993. EOf 72, se determinaran los valores limites de los alabeos y se calcularon los índices de calidad según la siguiente relación. (Ananias *et al* 2007)

$$I = \frac{Na \times 0 + Nb \times 0,5 + Nc \times 2 + Nd \times 2,5}{Na + Nb + Nc + Nd}$$

Donde: I: Índice de calidad
 Na: N° piezas sin defectos
 Nb: N° piezas con defectos leves
 Nc: N° piezas con defectos moderados
 Nd: N° piezas con defectos severos

Las grietas superficiales, internas y rajaduras fueron cuantificadas en su número (cantidad), por tanto no se ajustaron a ninguna norma de clasificación

Es importante destacar que las pruebas de tenedor para verificar la existencia de tensiones internas permite solo una medida cualitativa de las deformaciones que se producirán en el secado. Por lo tanto, no se utilizó ningún tipo de norma para su evaluación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis estadístico

En el análisis estadístico, a cada una de las cuatro poblaciones se midieron siete tipos de defecto. Cada uno de estos defectos fue tratado independientemente, determinándose el factor programa de secado aplicado. La hipótesis nula corresponde a “No existe diferencia significativa entre las medias de los cuatro programas de secado para el defecto r de secado”. $r = 1.....7$

Los valores correspondiente a los defectos de acanaladura, encorvadura, arquedura y torcedura no cumplían con dos supuestos importantes para realizar un análisis de varianza; estos supuestos son la normalidad de los datos y la homocedasticidad entre las muestras, por tanto se procedió a transformar los datos aplicando Logaritmo en base 10. Además estos defectos fueron divididos por el ancho de la pieza de madera correspondiente.

3.1.1 Acanaladura

Cuadro 3.1: Análisis de varianza para acanaladura*

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Cuociente F	P - valor
Entre grupo	0,684857	3	0,228286	5,43	0,0029
Intra grupo	1,85124	44	0,0420737		
Total	2,5361	47			

El cuadro de análisis de varianza descompone la varianza de acanaladura en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de los grupos. El F-ratio, es en este caso igual a 5,42585. Puesto que el valor p del test F es inferior a 0,05, hay diferencia estadísticamente significativa entre las acanaladura medias de un nivel de programa a otro para un nivel de confianza del 95,0%.

Cuadro 3.2: Test de Duncan para acanaladura

Programa	Frecuencia	Media	Grupos homogéneos
A.M	12	-1,98716	X
B	12	-1,88643	XX
B.M	12	-1,79512	XX
A	12	-1,66266	X

* Ver Apéndice B

En el cuadro 3.2 se puede apreciar las diferencias entre los distintos programas de secado aplicados, se aprecia que los mejores resultados se dan en la modificación del programa de secado A y del programa B, En la Figura 3.1 se puede apreciar la diferencia de intervalos de confianza entre los programas, donde se demuestran las diferencias existentes entre los programas, además no existe evidencia para decir que el programa de secado B modificado sus resultados de acanaladura sean diferentes a los presentados al programa de secado B; además el programa de secado B modificado es significativamente diferente al programa de secado A

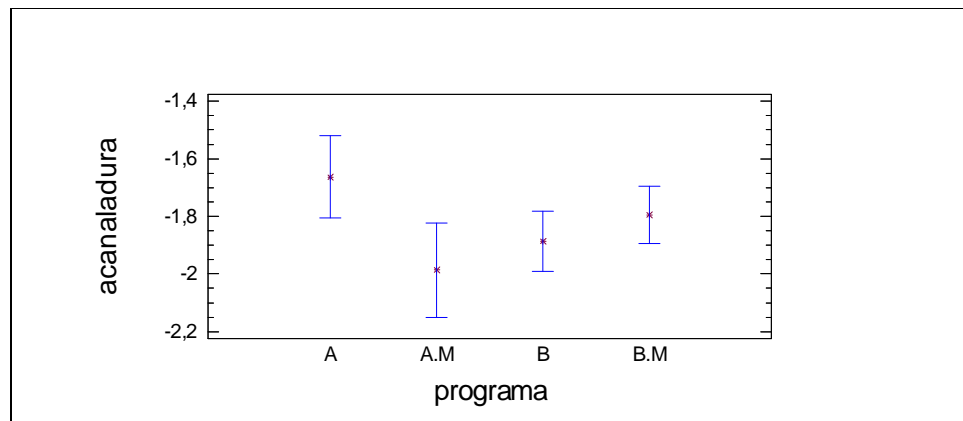


Figura 3.1: Media e intervalo de confianza al 95% para acanaladura

3.1.2 Encorvadura

Cuadro 3.3: Análisis de varianza para encorvadura*

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Cuociente F	P - valor
Entre grupo	0,692982	3	0,230994	2,21	0,1005
Intra grupo	4,60249	44	0,104602		
Total	5,29547	47			

El cuadro de análisis de varianza descompone la varianza de encorvadura en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de los grupos. El F-ratio, es en este caso igual a 2,20831. Puesto que el valor p del test F es superior o igual a 0,05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las encorvaduras medias de un nivel de programa a otro para un 95,0%.

* Ver Apéndice B

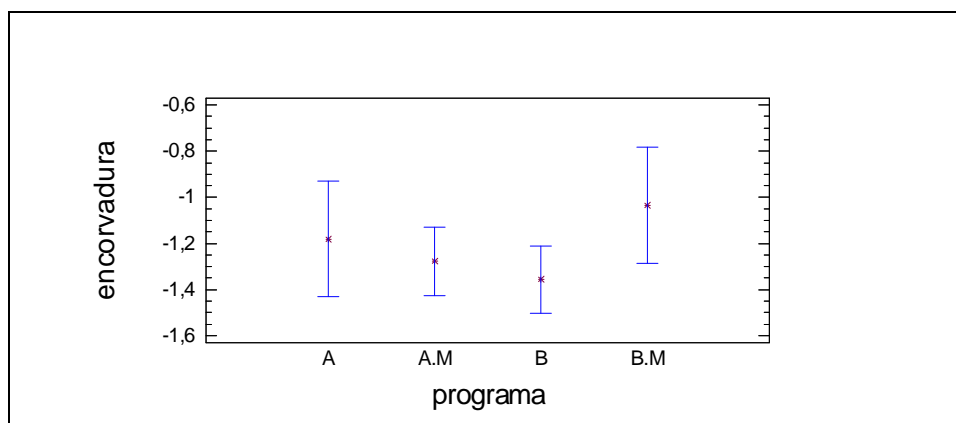


Figura 3.2: Media e intervalo de confianza al 95% para encorvadura

3.1.3 Arqueadura

Cuadro 3.4: Análisis de varianza para arqueadura*

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Cuociente F	P - valor
Entre grupo	0,95818	3	0,319393	10,87	0,0000
Intra grupo	1,29329	44	0,0293929		
Total	2,25147	47			

El cuadro de análisis de varianza descompone la varianza de arqueadura en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de los grupos. El F-ratio, es en este caso igual a 10,8663. Puesto que el p-valor del test F es inferior a 0,05, hay diferencia estadísticamente significativa entre las arqueadura medias de un nivel de programa a otro para un nivel de confianza del 95,0%.

Cuadro 3.5: Test de Duncan para arqueadura

Programa	Frecuencia	Media	Grupos homogéneos
B	12	-1,30841	X
B.M	12	-1,26227	X
A.M	12	-1,25766	X
A	12	-0,953057	X

En el cuadro 3.5 se puede apreciar que existe una homogeneidad de tres programas de secado, mientras que el programa de secado A es significativamente diferente a los otros programas de secado,, siendo además el que presenta la más alta Arqueadura. En la Figura

* Ver Apéndice B

3.3 se puede apreciar el intervalo de confianza para el programa A; el cual se encuentra muy distante de los otros tres programas que son homogéneos entre si.

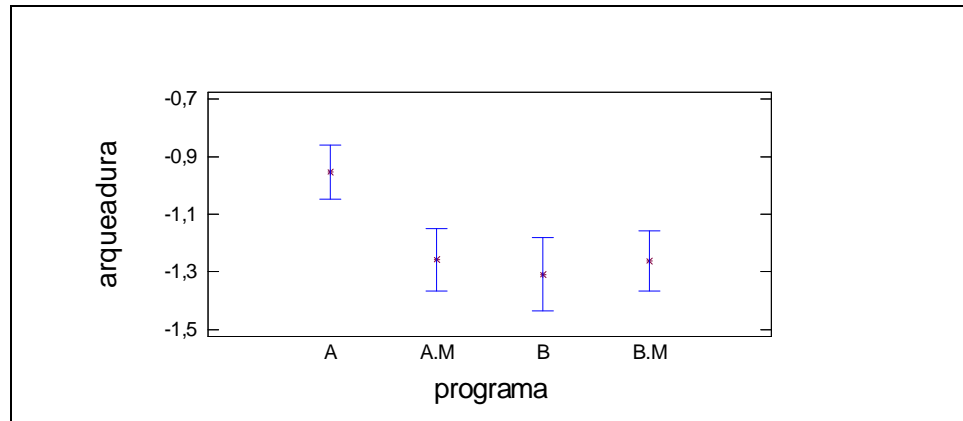


Figura 3.3: Media e intervalo de confianza al 95% para arqueadura

3.1.4 Torcedura

Cuadro 3.6: Análisis de varianza para torcedura*

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Cuociente F	P – valor
Entre grupo	0,968417	3	0,322806	7,10	0,0005
Intra grupo	1,9995	44	0,0454431		
Total	2,96791	47			

El cuadro de análisis de varianza descompone la varianza de torcedura en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de los grupos. El F-ratio, es que en este caso igual a 7,10351. Puesto que el valor p del test F es inferior a 0,05, hay diferencia estadísticamente significativa entre las torceduras medias de un nivel de programa a otro para un nivel de confianza del 95,0%.

Cuadro 3.7: Test de Duncan para torcedura

Programa	Frecuencia	Media	Grupos homogéneos
A.M	12	-1,45896	X
B	12	-1,3602	X
B.M	12	-1,28583	X
A	12	-1,07255	X

* Ver Apéndice B

En el cuadro 3.7 se puede apreciar que existe una homogeneidad de tres programas de secado, mientras que el programa de secado A es estadísticamente diferente, siendo además el que presenta la más alta torcedura. En la Figura 3.4 se puede apreciar el intervalo de confianza para el programa A; el cual se encuentra muy distante de los otros tres programas que son homogéneos entre si.

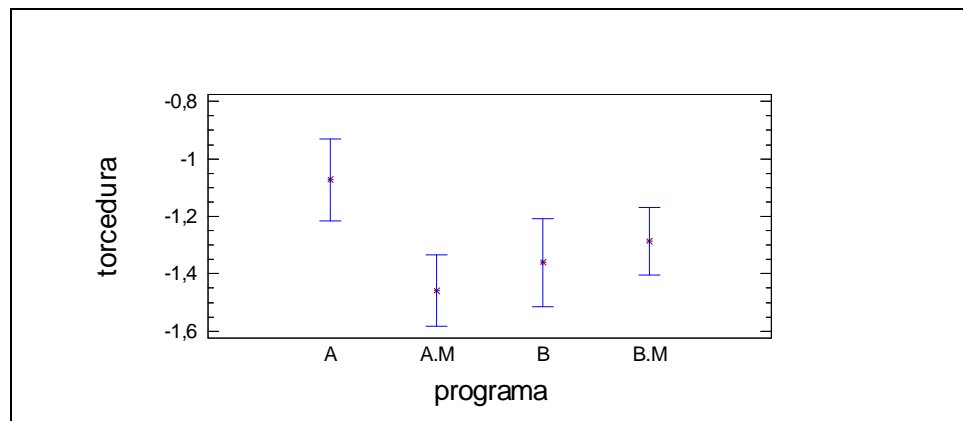


Figura 3.4: Media e intervalo de confianza al 95% para torcedura

3.1.5 Grietas internas

Cuadro 3.8: Análisis de varianza para grietas internas

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Cuociente F	P – valor
Entre grupo	21,2292	3	7,0764	1,32	0,2806
Intra grupo	236,2500	44	5,3693		
Total	257,4792	47			

El cuadro de análisis de varianza descompone la varianza de grietas internas en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de los grupos. El F-ratio, es en este caso igual a 1,31793. Puesto que el valor P del test F es superior o igual a 0,05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las grietas internas medias de un nivel de programa a otro para un 95,0%.

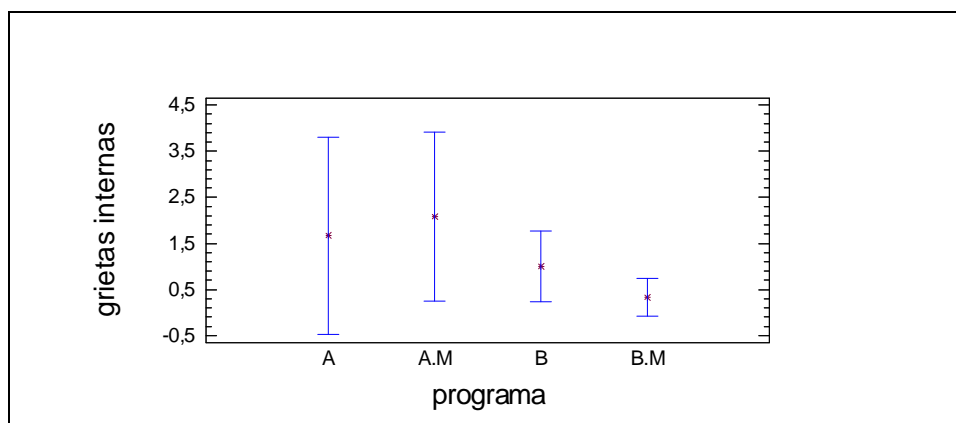


Figura 3.5: Media e intervalo de confianza al 95% para Grietas internas

3.1.6 Grietas superficiales

Cuadro 3.9: Análisis de varianza para grietas superficiales

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Cuociente F	P – valor
Entre grupo	1,5000	3	0,5	0,06	0,9824
Intra grupo	393,1670	44	8,9356		
Total	394,6670	47			

El cuadro de análisis de varianza descompone la varianza de grietas superficiales en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de los grupos. El F-ratio, es en este caso igual a 0,0559559. Puesto que el valor p del test F es superior o igual a 0,05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las grietas superficiales medias de un nivel de Programa a otro para un 95,0%.

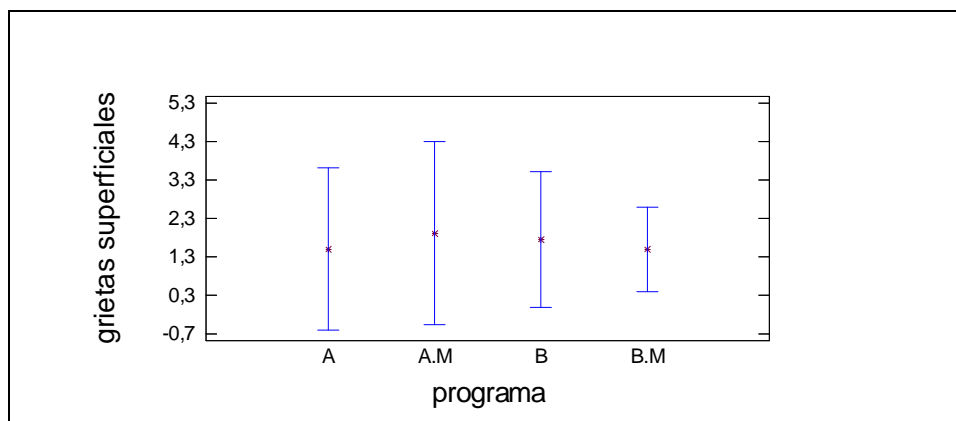


Figura 3.6: Media e intervalo de confianza al 95% para Grietas superficiales

3.1.7 Rajaduras

Cuadro 3.10: Análisis de varianza para rajaduras

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Cuociente F	P – valor
Entre grupo	0,2291	3	0,0764	0,54	0,6589
Intra grupo	6,2500	44	0,1425		
Total	6,4791	47			

El cuadro de análisis de varianza descompone la varianza de rajaduras en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de los grupos. El F-ratio, es en este caso igual a 0,537778. Puesto que el valor p del test F es superior o igual a 0,05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las rajaduras medias de un nivel de Programa a otro para un 95,0%.

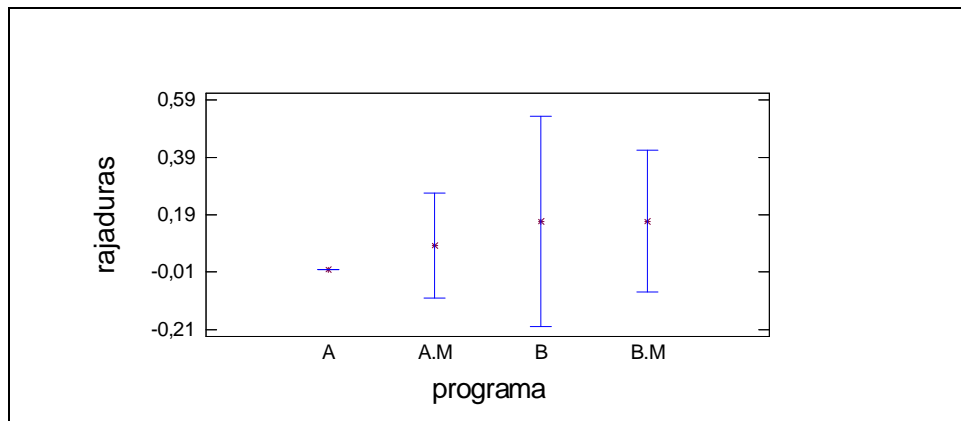


Figura 3.7: Media e intervalo de confianza al 95% para rajaduras

3.2 Contenido de humedad de la madera

En el siguiente cuadro se resumen, según programa, los contenidos de humedad final de cada carga de madera

Cuadro 3.11: Contenido de humedad inicial y final promedio según programa de secado

	Programa A	Programa A.M	Programa B	Programa B.M	Programa B.R
CH inicial [%]	63,5	44,0	42,0	52,2	48,4
CH final [%]	9,4	8,9	8,7	10,9	8,9
Desv. Est [%]	0,52	0,68	0,48	1,03	1,26
CV [%]	5,5	7,6	5,5	9,4	14,2
Rango	1,7	1,7	1,5	4,1	4,4

En el caso del programa A, se puede ver en cuadro 3.11 que el rango de contenido de humedad se mueve entre [8,55 – 10,25]%, lo cual clasifica esta humedad en una categoría de S (secado estándar), en el caso del programa A modificado el rango de humedad esta comprendido entre los valores [8,05 – 9,75]%, lo cual clasifica esta humedad en una categoría de Q (secado de calidad) según estándares presentados por la comisión europea*.

En el caso del programa B, se puede ver que el rango de contenido de humedad se mueve entre [7,95 – 9,45]%, lo cual clasifica esta humedad en una categoría de E (secado exclusivo), en el caso del programa B modificado el rango de humedad esta comprendido entre los valores [8,85 – 12,95]%, en este caso el rango de humedad para este programa no concuerda con ningún tipo de clasificación según estándares de la comunidad europea.

La repetición del programa B se encuentra dentro de la clasificación S (Secado estándar); con un rango de humedad comprendido entre [6,7 – 11,1]%, este resultado no confirma el resultado obtenido primeramente para este programa de secado, este se puede deber a que la repetición del programa de secado se realizo con una mayor cantidad de madera.

Los programas que resultaron mas homogéneos en su resultado final corresponden al programa A y al programa B, los cuales tienen un coeficiente de variación de las muestras de 5,5%, en el caso del programa B con esta baja variación y un promedio de humedad cercano al esperado (8% de contenido de humedad), pueden explicar el porque de la clasificación de humedad que posee.

En el caso del programa B modificado tiene una variación entre los datos de 9,4% y un alto promedio de contenido de humedad (superior al 10%), muy superior al esperado llegar en el secado; esto explica el motivo de que la humedad del programa de secado no quede en ningún estándar de clasificación de los estándares de la comunidad europea, además existen humedades que salen de los rangos establecidos en esta norma. El programa A modificado por su parte tiene una variación de los resultados de un 7,6%, a pesar de esta variación los valores de humedad no sobrepasan los límites de una calidad de secado Q.

La repetición del programa B es el que posee la máxima variación de todos con un 14,1%, pero esto no impide que sus valores no sobrepasen la calidad de secado S; esta repetición no confirma los resultados para el programa de secado B, pero hay que tener la consideración que la madera es un material muy variable en una misma especie y en un mismo ejemplar, además de una mayor cantidad de piezas a secar y una mayor presencia de medula en las piezas de madera a secar.

Las diferencias en los contenidos de humedad de cada uno de los programas de secado realizados se deben exclusivamente a que son programas totalmente diferentes

* Ver anexo A

(exceptuando el programa de secado B y su repetición), o por los contenidos de humedad inicial con el cual se empieza a ejecutar el tratamiento de secado.

En el cuadro 3.12 se presentan los resultados de gradiente de humedad para los cinco programas de secado

Cuadro 3.12: Resumen gradiente de humedad para los cinco programas de secado

	Programa A	Programa A.M	Programa B	Programa B.M	Programa B.R
CH periférico [%]	8,1	9,5	8,2	9,1	9,4
Desv. Estándar [%]	0,21	0,29	0,03	0,18	0,08
CV [%]	2,6	3,1	0,4	2,0	0,9
Rango	2,9	3,5	2,3	2,1	2,8
CH central [%]	8,6	11,3	9,3	10,1	11,4
Desv. Estándar [%]	0,09	0,11	0,18	0,04	0,09
CV [%]	1,1	1,0	1,9	0,4	0,8
Rango	2,8	5,0	2,3	5,0	6,5

Para el programa de secado A la diferencia entre la humedad central y periférica corresponde a 0,5% este valor corresponde al rango determinado por la clasificación de secado E (secado exclusivo), para el programa A modificado la diferencia corresponde a 1,8%, este valor corresponde a la clasificación de secado Q (secado calidad), para el programa B la diferencia corresponde a 1% correspondiente a una clasificación del tipo E, para el programa B modificado corresponde a 1% correspondiente a una clasificación del tipo E. El programa B repetido tiene una clasificación según la comunidad europea de Q con una diferencia entre la humedad central y la humedad periférica de 2%.

La humedad central de las piezas resulta ser mas homogénea que la humedad periférica dentro de un mismo programa, esto se debe principalmente a que la madera al estar en contacto en el ambiente alcanza el contenido de humedad de equilibrio según la humedad relativa del ambiente, y se debe considerar para el análisis que las piezas de maderas fueron cuantificadas en días diferentes con lo cual la humedad del ambiente es distinta.

Al complementar las clasificaciones de contenido de humedad final y del gradiente de humedad de las piezas para cada uno de los programas de secado se puede determinar la clasificación resultante de cada uno de los programas de secado; para esto se eligió la menor calificación entre estas dos variables. Por tanto para el programa de secado A la clasificación corresponde a S (secado estándar), para el programa de secado A modificado Q (secado de calidad). El programa de secado B queda con una clasificación de secado E (secado exclusivo), mientras que el programa B modificado no queda dentro de ningún estándar de calidad de la comisión europea. La repetición del programa B no concuerda con los resultados preliminares para este programa; este resultado corresponde a una

clasificación del tipo S (secado estándar) esto principalmente por la heterogeneidad del contenido de humedad final de las piezas para este proceso de secado.

3.3 Tiempos de secado, recuperación de colapso y tensiones internas

El cuadro 3.13 muestra los tiempos de cada programa de secado según etapa del proceso, el programa de secado A tuvo una duración* de secado de 369,5 horas, el programa de secado A modificado tuvo una duración de 85,2 horas. El programa de secado B tuvo una duración de 130 horas y el programa de secado B modificado tuvo una duración de 185 horas; mientras que la repetición del programa B tuvo una duración de 154,5 horas. La diferencia entre los programas de secado tentativos y los modificados radica principalmente en que los contenidos de humedad iniciales de aplicación de dichos programas son diferentes.

Cuadro 3.13: Tiempos[†] de secado en horas según etapa y programa de secado

Programa	Etapas				Total Horas
	Vaporizado inicial	Secado	Reacondicionado	Acondicionado final	
A	12,0	369,5	0,0	8,0	389,5
A.M	12,0	85,2	6,0	10,0	113,2
B	0,0	130,0	6,0	4,0	140,0
B.M	0,0	185,0	6,0	10,0	201,0
B.R	0,0	154,5	6,0	11,0	171,5

Para realizar una comparación entre los tiempos se tuvo que realizar una extrapolación de los tiempos a base de el contenido de humedad inicial mayor, correspondiente al programa de secado A con un 52,7% de contenido de humedad, esta humedad corresponde a 12 horas después de iniciar el secado, puesto que en el programa A y en el A modificado se aplicó un vaporizado inicial de 12 horas como se muestra en el cuadro 3.10.

El programa A modificado si hubiese comenzado con un contenido de humedad de 52,7% al aplicar el programa hubiese demorado un tiempo de 107,7 horas, por tanto se puede apreciar una disminución en su tiempo de secado cercano a 2/3 del programa tentativo; el programa B tiene un tiempo esperado de 142,2 horas con humedad inicial de la madera de 52,7%, mientras que el proceso B modificado tendría un tiempo de secado esperado de 189 horas, en este caso no hubo una reducción en el tiempo de secado, pero la modificación de los programas de secado por la técnica de Drying effort no asegura que exista una disminución de tiempos y de defectos, solo modifica los programas de forma teórica;

* Estos tiempos corresponden a la aplicación del programa de secado propiamente tal, puesto que vaporizado inicial y reacondicionado son tiempos iguales entre programas, mientras que el tiempo de acondicionado final se explicara mas adelante junto con las tensiones internas de la madera.

† Ver Apéndice D

mientras que la repetición del programa B tiene un tiempo esperado de 165,9 horas, existiendo una diferencia de un día aproximadamente con el programa B.

En las figuras 3.8 a la 3.12 se presentan las curvas de secado por cada programa de secado; estas curvas de secado pueden ser comparadas sobre la base de la tasa de secado

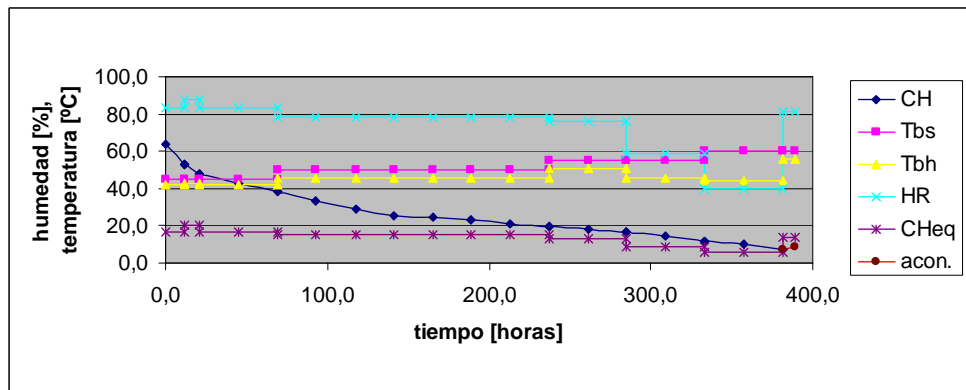


Figura 3.8: Curva de secado para el programa A

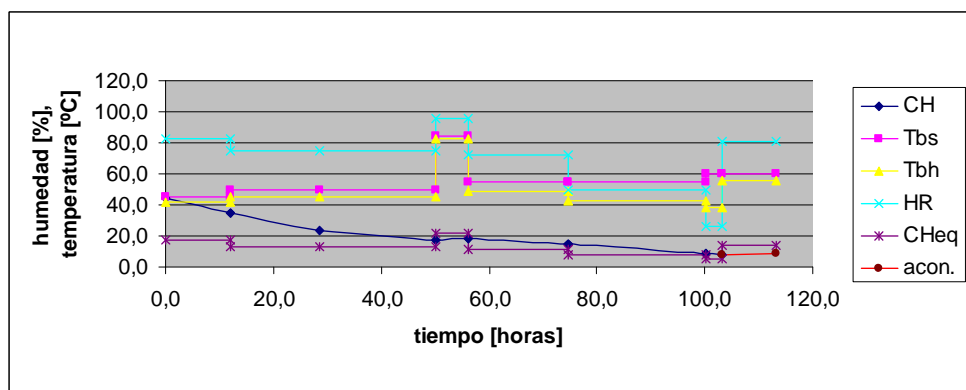


Figura 3.9: Curva de secado para programa A modificado

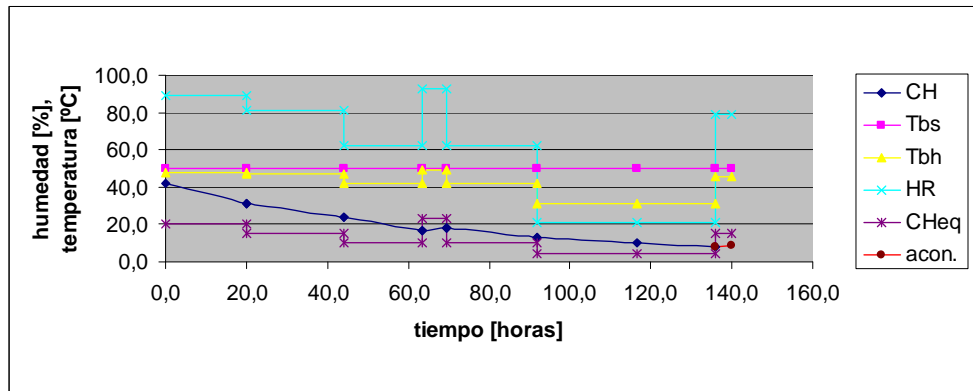


Figura 3.10: Curva de secado para programa de secado B

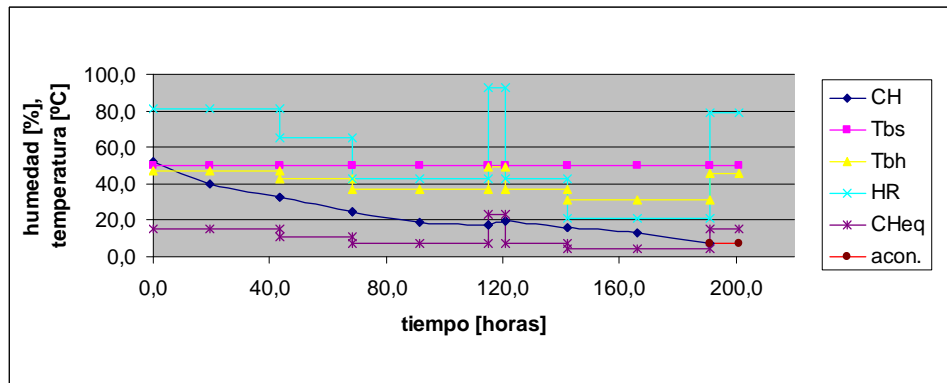


Figura 3.11: Curva de secado para progre de secado B modificado

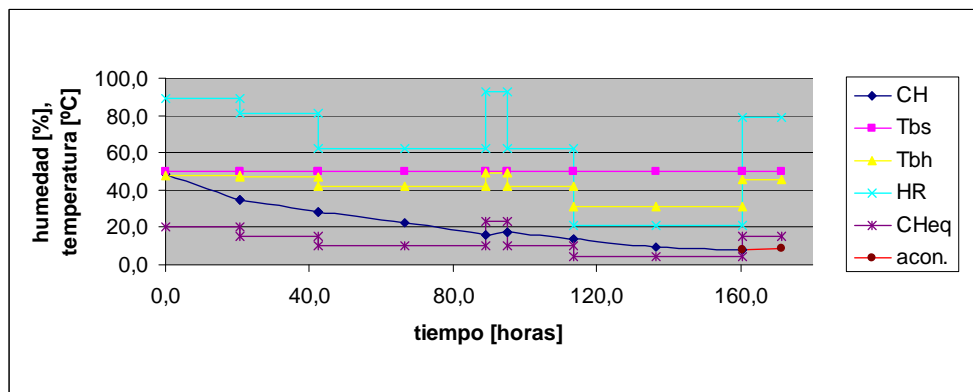


Figura 3.12: Curva de secado para programa de secado B repetido

Cabe mencionar que los contenidos de humedad finales de estos cinco programas de secado son similares en su promedio según lo expuesto en el punto 3.1 y presentados en el cuadro 3.11

En los cuadros 3.14 y 3.15 se presentan las tasas de cambio de CH [%] para cada uno de los programas tentativos y modificados; este dato es útil para realizar una comparación de intervalos en las curvas de secado (curva de humedad).

Cuadro 3.14: Tasas de secado para programa A y programa de secado A modificado

Etapa CH [%]	Programa A			Programa A modificado		
	TBS [°C]	ΔT° [°C]	Tasa [CH/horas]	TBS [°C]	ΔT° [°C]	Tasa [CH/horas]
Verde – 60	45	2	0,51	45	2	-----
60 – 40	45	3	0,20	45	4	-----
40 – 20	50	4	0,11	50	5	0,46
20 – 15	55	4,5	0,07	55	6	0,2
Reacondicionado	-----	-----	-----	84	1	-0,23*
15-.10	55	9	0,10	55	12	0,24
10. – 8	60	16	0,08	60	22	0,33

Cuadro 3.15: Tasas de secado para programa B, programa B modificado y B repetido

Etapa CH [%]	Programa B			Programa B repetido	Programa B modificado		
	TBS [°C]	ΔT° [°C]	Tasa [CH/horas]	Tasa [CH/horas]	TBS [°C]	ΔT° [°C]	Tasa [CH/horas]
Verde- 35	50	2	0,55	0,66	50	3	0,45
35,-25	50	3	0,29	0,30	50	7	0,32
Reacondicionado	50	1	-0,20*	-0,23*	50	1	-0,38*
25-15	50	8	0,29	0,22	50	13	0,17
15-8.	50	19	0,11	0,13	50	19	0,2

En el cuadro 3.14 se puede verificar la comparación entre el programa A y su modificación, Se observa que el programa A modificado tuvo altas tasas de secado en comparación al programa A, lo que significa menor tiempo de secado para el programa A modificado; en el cuadro 3.15 se puede verificar que entre el programa B y su repetición las tasas de secado son relativamente similares observando tasas más altas en las dos primeras etapas de secado en el programa B repetido, mientras que el programa B modificado posee menores tasas de secado; esto explica el tiempo del proceso en este último programa de secado.

Dentro de estas tasas de secado en el reacondicionamiento fueron homogéneos exceptuando la tasa para el programa B modificado con un -0,38 CH[%]/hora. Esta comparación se puede realizar puesto que para todos los programas donde se realizó un reacondicionamiento el tiempo fue de 6 horas. Se debe tener claro que las condiciones iniciales en el reacondicionado son similares variando en medio punto porcentual el contenido de humedad de inicio de esta técnica

* Número negativo corresponde a un aumento de humedad

Los tiempos de reacondicionado fueron iguales para los programas en los cuales se aplico esta técnica; en el cuadro 3.16 se presentan los resultados de recuperación de colapso de las muestras de control para cada uno de los programas de secado.

A pesar que los programas de secado B, B repetido y B modificado tienen mayores tasas de secado, el tiempo de estos tres programas no resulta ser menor que el tiempo registrado por el programa de secado A modificado, en el caso de del programa B y B repetido tienen contenidos de humedad iniciales similares al programa de secado A modificado.

Cuadro 3.16: Resultados recuperación de colapso para cada uno de los programas de secado*

Programa de secado	RC [%]	CV [%]	Máximo [%]
A	0	0	0
A.M	25,7	3,7	26,8
B	12,5	50,5	17,8
B.M	8,5	55,5	14,0
B.R	11,7	43,7	20,1

Se puede apreciar que la máxima recuperación de colapso se obtuvo en el programa A modificado con un 25,7%, en tanto el programa B y su repetición tuvieron una recuperación de colapso de 12,5 % y 11,5%, esto se puede deber principalmente a que este programa (b y s repetición) es una innovación en programas de secado el cual corresponde a secar madera con altas humedades haciendo que la madera se colapse en menor grado que un programa con un ambiente más seco. El programa A modificado se aplicó un reacondicionamiento con temperatura bulbo seco 84 °C, temperatura bulbo húmedo 83 °C y humedad relativa de 96%, el programa B modificado por su parte tuvo una recuperación de colapso de 8,5%, el cual fue el menor de todos los aplicados, cabe mencionar que este programa no corresponde a uno de altas humedades en sus etapas como el programa de secado B, en este caso es mejor aplicar el reacondicionamiento realizado al programa A modificado, puesto que la madera de Coihue se colapsa fuertemente y altas temperaturas y humedad relativa del ambiente también altas, hacen que la madera se vuelva más plástica, provocando que se recupere en gran medida esta contracción anormal de la madera.

Según el Instituto Forestal (INFOR) (1973), menciona que la madera de Coihue maduro puede llegar a tener una recuperación del colapso que se encuentra entre 44% a 47%; donde la contracción por colapso se encuentra entre 5,2% a 9,3%; la madera de renoval de Coihue tiende a colapsarse en una menor cantidad[†].

* Ver Apéndice E

† Ver el Cuadro E.1 presentado en el Apéndice E

En la Figura 3.13 se puede apreciar las probetas de control de tensiones internas de la madera (probetas tenedor) antes de aplicar acondicionamiento final y posterior a esta etapa de secado.

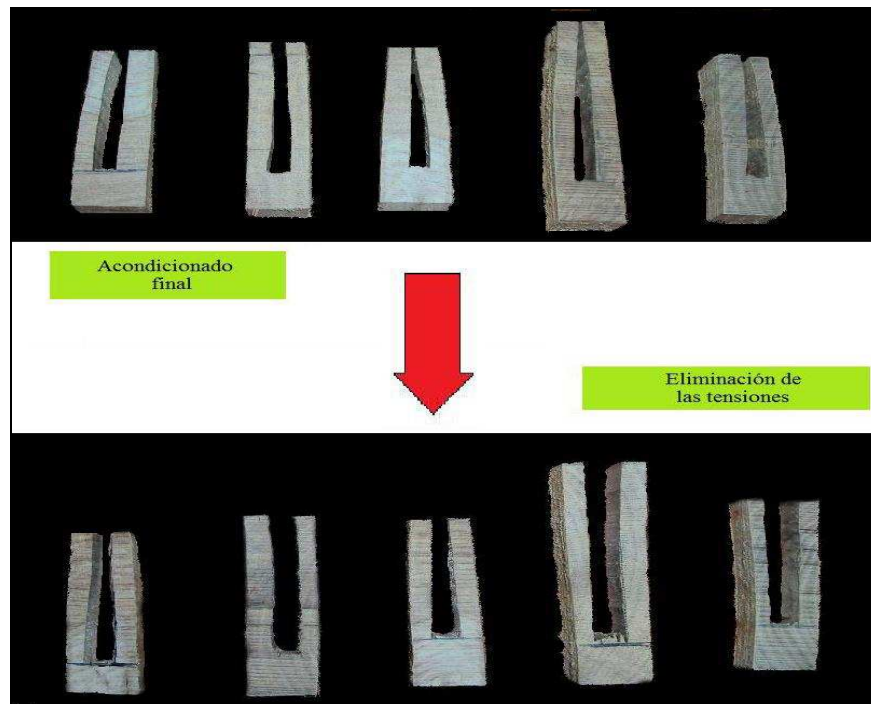


Figura 3.13: Tensiones en las probetas tenedor antes y después del acondicionamiento

En todos los ensayos realizados se presentaron al finalizar la aplicación de los programas de secado tensiones internas en la madera, estas tensiones fueron de distinta magnitud para todo los programas, los dientes de estas probetas se curvaron hacia adentro, comportamiento debido a que existen esfuerzos de tracción en el centro de la madera y de compresión en la superficie de la pieza. Los tiempos de aplicación del acondicionamiento final para cada programas pueden ser apreciados en el cuadro 3.10. La medición de la magnitud de estas tensiones fue realizada a través del tiempo de aplicación de esta técnica, sobre la base de esto se puede decir que la menor magnitud de tensiones se presentó en el programa de B con 4 horas de aplicación del acondicionamiento final; los otros tres programas realizados, los tiempos de acondicionamiento se mueven entre las 8 horas (programa A) y 10 horas (programa A modificado y B modificado). La repetición del programa B tiempo de acondicionamiento fue de 11 horas, no concordando con los resultados preliminares.

Para realizar esta técnica se aplicaron temperaturas del bulbo seco correspondiente a la última etapa del programa de secado, con una diferencia psicrométrica de 4 °C, lo que asegura una alta humedad relativa y con esto un aumento en el contenido de humedad de la madera.

Según el Instituto Forestal (INFOR) (1994), los tiempos de secado* de maderas de renoval de Roble corresponde a 336 horas (14 días) para un programa lento y 144 horas (6 días) para un programa rápido; mientras que para el renoval de Raulí los tiempos son de 240 horas (10 días), correspondiente a un espesor de 25 mm. Si los contenidos de humedad iniciales con los que se empezó a secar la madera de coihue fuesen similares a los que se iniciaron estos otros *Nothofagus*, el tiempo de secado para el renoval de coihue sería mayor, puesto que con la extrapolación presentada con anterioridad cuando se iniciaba con un contenido de humedad de 52,7% el tiempo no fue inferior a 100 horas, este tiempo de secado corresponde a la aplicación de proceso propiamente tal, sin considerar vaporizado inicial, reacondicionado y acondicionado final. El tiempo total para los programas aplicados pueden ser comparables al tiempo obtenido por el programa correspondiente al renoval de Roble bajo un proceso rápido.

Según Ramírez (2004), menciona que el tiempo de secado para una pieza de madera de coihue adulto de 30 mm. de espesor sería de 33 días† (792 horas), con un contenido de humedad inicial de alrededor de un 60%. Este tiempo es bastante mayor al presentado por los programas de secado realizado en este trabajo a modo de ejemplo el programa con el mayor tiempo total de secado fue de 389,5 horas (16 días), mientras que en renoval de Roble del mismo espesor se logra un tiempo de secado total bajo un contenido de humedad inicial del 60 % de 8,8 días (212 horas), que resulta ser mayor que todos los programas de secado realizados en este trabajo, exceptuando el programa de secado A .

3.4 Alabeos‡ y grietas producidas en el secado

En todos los programas que se realizaron se presentaron deformaciones y grietas en distinta magnitud. En el cuadro 3.17 se presentan los resultados promedios y máximos finales de los cuatro alabeos a considerar, se puede verificar en este cuadro que las deformaciones menores se presentaron en el programa de secado B.

* Al hablar de tiempos de secado se hace referencia a que el programa de secado esta compuesto por vaporizado inicial, programa de secado propiamente tal, reacondicionado y acondicionado final.

† Correspondiente al tiempo de secado total (vaporizado inicial, secado propiamente tal, reacondicionado y acondicionado final).

‡ Acanaladura, encorvadura, arqueadura y torcedura

Cuadro 3.17: Valores de deformación final promedio y máxima según programa de secado [mm].

Programa		Deformación			
		Acanaladura	encorvadura	arqueadura	torcedura
A	Promedio	2,49	7,76	11,46	9,12
	Máximo	5,79	15,68	18,27	17,81
A.M	Promedio	1,11	6,61	5,69	3,5
	Máximo	2,62	13,46	11,42	5,43
B	Promedio	1,23	4,25	4,78	4,33
	Máximo	1,84	6,78	7,76	9,33
B.M	Promedio	1,76	12,98	5,96	5,91
	Máximo	2,5	35,66	10,26	11,99
B.R	Promedio	1,45	3,16	6,41	5,15
	Máximo	2,83	7,5	12,02	10,42

Estos valores no son comparables entre si puesto que corresponden a flechas de deformación con distintos anchos de pieza, sobre la base de esto para realizar una comparación de la flecha se procedió a estimar valores de las distintas deformaciones con el ancho promedio de las piezas de madera. En el cuadro 3.18 se presentan estos valores estimados*

Cuadro 3.18: Valores de deformación final promedio y máxima estimada según programa de secado [mm]

Programa		Deformación			
		Acanaladura	encorvadura	arqueadura	torcedura
A	Promedio	2,66	8,30	11,46	9,76
	Máximo	4,24	11,47	18,27	13,03
A.M	Promedio	1,18	7,01	5,69	3,71
	Máximo	2,10	10,78	11,42	4,35
B	Promedio	1,41	4,86	4,78	4,95
	Máximo	1,37	5,06	7,76	6,97
B.M	Promedio	1,74	12,83	5,96	5,84
	Máximo	1,67	23,80	10,26	8,00
B.R	Promedio	1,25	2,73	6,41	4,45
	Máximo	1,70	4,51	12,02	6,26

Tomando en consideración el cuadro 3.18 se pueden comparar las deformaciones entre programas. Puede verificarse que en los valores promedio de acanaladura fueron relativamente similares entre los distintos programas realizados, la encorvadura bajo el programa de secado B modificado se puede ver que presenta la mayor flecha promedio de deformación, así como la máxima flecha también se vió presente en el programa B modificado; en la arqueadura el mayor promedio se presenta en el programa de secado A, como también el máximo valor de flecha de deformación. Los resultados de este defecto

* Los valores de las deformación estimadas fueron aplicados para acanaladura, encorvadura y torcedura para los cinco programas de secado, esta transformación corresponde a deformación neta por $(105,92/\text{ancho pieza})$

para los otros programas fueron relativamente similares en promedio, mientras que el defecto torcedura el mayor valor y máximo también se ve presente en el programa de secado A, cabe mencionar además, que los resultados del programa B y de la repetición de este mismo son relativamente similares en promedio y máximo exceptuando para el valor de flecha máximo presente en la arqueadura; estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos en el análisis de varianza presentados en el punto 3.1

La conclusión acerca de las deformaciones promedio y máximas resultantes, no resulta conveniente realizarla a través de valores estimados como los que se presentan en el cuadro 3.18, es por esto que es conveniente realizar una clasificación por medio de estándares normalizados según la Norma Chilena NCh 993; en el cuadro 3.19 se presentan los resultados la intensidad de las deformaciones promedio para los distintos programas de secado realizado.

Cuadro 3.19: Intensidad de deformaciones promedio según programa de secado

	Programa de secado				
	A	A.M	B	B.M	B.R
Acanaladura	C	B	B	B	B
Encorvadura	C	C	B	C	B
Arqueadura	B	B	B	B	B
Torcedura	C	B	B	B	B

Se puede observar en este cuadro que las menores intensidades promedio de deformación se pueden apreciar en el programa B, así como para la repetición de este programa también se observa que la intensidad de deformaciones promedio son del tipo B. El programa A tuvo la mayor intensidad de deformaciones promedio con deformaciones del tipo C en acanaladura, encorvadura y torcedura; el defecto que tuvo la mayor intensidad fue la encorvadura con presencia de intensidad del tipo C en los programas de secado A, A modificado y B modificado. El defecto con menor presencia corresponde a la arqueadura puesto que todos los programas de secado presentan una intensidad del tipo B.

En el cuadro 3.20 se puede apreciar la clasificación de intensidad de deformación para los valores máximos según programa de secado

Cuadro 3.20: Intensidad de deformaciones máxima según programa de secado

	Programa de secado				
	A	A.M	B	B.M	B.R
Acanaladura	D	C	C	C	C
Encorvadura	D	D	C	D	D
Arqueadura	C	B	B	B	B
Torcedura	D	C	D	C	C

Según este cuadro se puede apreciar que las mas altas intensidades se dieron en el programa de secado A, el programa de secado A modificado y B modificado. Las intensidades son las mismas en los distintos alabeos. La repetición del programa B tuvo las mismas intensidades de deformación que el programa preliminar de secado B exceptuando la encorvadura donde el programa B repetido tuvo una clasificación de intensidad del tipo D mientras que el programa B presenta una intensidad del tipo C.

La Figura 3.14 presenta la distribución de frecuencia de la intensidad de deformación para acanaladura según programa de secado aplicado.

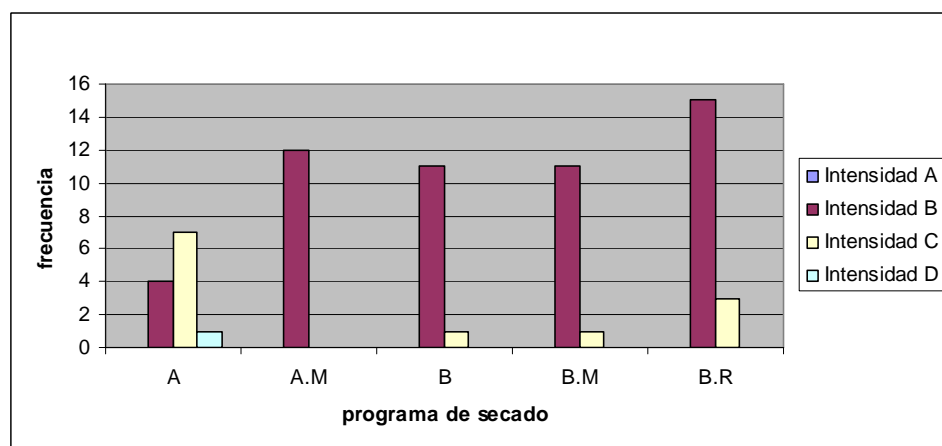


Figura 3.14: Gráfica de frecuencia de intensidad de acanaladura para los distintos programas de secado

En esta figura se puede apreciar en todo los programas exceptuando el programa A la intensidad de defecto que predomina es del tipo B, mientras que el programa A tiene una mayor presencia de intensidad del tipo C. Cabe mencionar además que la intensidad del programa B repetido concuerda con los resultado preliminares del programa B.

La Figura 3.15 presenta la distribución de frecuencia de la intensidad de deformación para encorvadura según programa de secado aplicado.

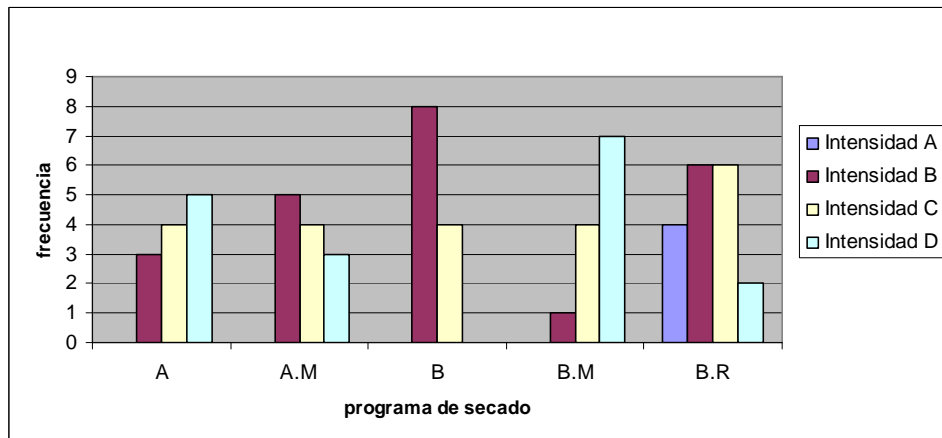


Figura 3.15: Gráfica de frecuencia de intensidad de encorvadura para los distintos programas de secado

Se puede apreciar en la figura que la distribución de intensidad en este defecto no es tan uniforme como en la acanaladura. Se aprecia que el programa A y el programa B modificado tienen una mayor cantidad de defectos de intensidad D, mientras que en el caso del programa B presenta una mayor intensidad de defecto del tipo B, pero con presencia de cuatro piezas con intensidad de defecto C. Estos resultados no concuerdan en su totalidad con la repetición del programa B puesto que existe la misma cantidad de piezas con intensidad de defecto del tipo B como del tipo C. Debe mencionarse además, que en este programa existe una presencia de dos piezas con calificación de intensidad de tipo D y además la presencia de piezas que no presentaron defectos siendo el único programa de secado en el cual existieron piezas que tuvieron una intensidad de deformación del tipo A.

La Figura 3.16 presenta la distribución de frecuencia de la intensidad de deformación arqueadura según programa de secado aplicado.

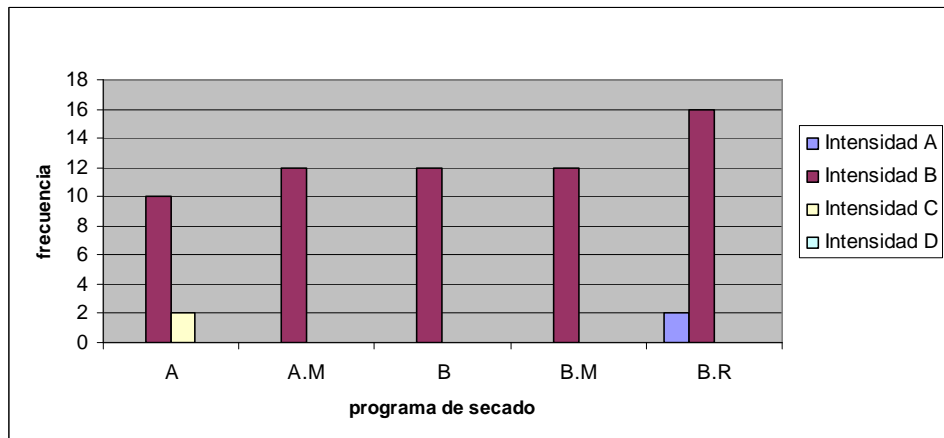


Figura 3.16: Gráfica de frecuencia de intensidad de Arqueadura para los distintos programas de secado

Según lo presentado en la figura la arqueadura fue la que presentó los mejores resultados estando la mayor parte de las piezas en una intensidad del tipo B exceptuando el programa de secado A donde se presentaron dos piezas con una intensidad del tipo C, mientras que el programa B repetido tuvo dos piezas que se encuentran en la intensidad A, siendo el que entregó el mejor resultado, incluso mejor que el ensayo preliminar (programa de secado B)

La figura 3.17 presenta la distribución de frecuencia de la intensidad de deformación torcedura según programa de secado aplicado.

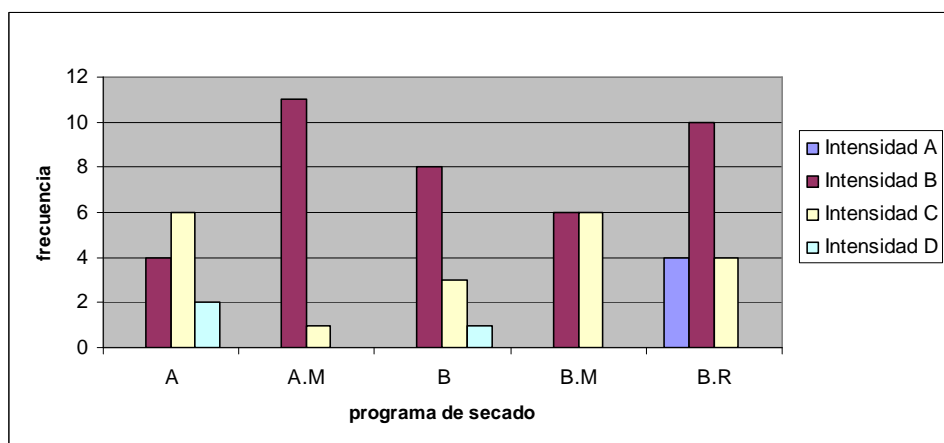


Figura 3.17: Gráfica de frecuencia de intensidad de torcedura para los distintos programas de secado

Se puede apreciar que en el caso del programa A y el programa B modificado, existe una alta presencia de piezas con intensidad de deformación del tipo C, mientras que en el

programa A modificado, programa B y Programa B repetido la mayor frecuencia corresponde a piezas con intensidad de secado B, cabe mencionar que el programa B repetido tiene piezas que están dentro de la clasificación de intensidad del tipo A.

Todas estas distribuciones concuerdan plenamente con la clasificación realizada en el cuadro 3.17, lo que indica junto con las figuras presentadas con anterioridad (Fig. 3.14 a la Fig. 3.17) que el programa de secado B es el programa con los menores defectos presentes y una distribución mas homogénea de estos mismos defectos. El programa B repetido por su parte confirma los resultados obtenidos con anterioridad exceptuando la deformación de encorvadura; aunque igual la mayor parte de sus piezas están dentro de la clasificación obtenida por el programa B, además de presentar piezas sin deformaciones por secado (intensidad del tipo A), además se confirma que el defecto con mejor clasificación fue la arqueadura.

Una de las formas de clasificar un programa de secado aparte de clasificarlo sobre la base de la Normas Chilena NCh 993, es el de calcular el índice de calidad de secado, el cual determina si las condiciones de secado fueron las adecuadas y si los resultados son de calidad, en el cuadro 3.21 se presentan los índices de calidad determinados para cada uno de los programas de secado realizados

Cuadro 3.21: Índices de calidad* según programa de secado

Programa	Deformación				Total índice
	Acanaladura	Encorvadura	Arqueadura	Torcedura	
A	0,38	1,38	0,21	0,88	2,85
A.M	0,00	1,08	0,00	0,00	1,08
B	0,00	0,33	0,00	0,08	0,41
B.M	0,00	1,83	0,00	0,42	2,25
B.R	0,03	0,53	0,06	0,14	0,76

Se puede apreciar en este cuadro que los índices de calidad concuerdan plenamente con los resultados expuesto con anterioridad donde encorvadura presenta los mayores índices de calidad, mientras que arqueadura presenta los menores (se puede considerar la acanaladura como un mejor resultado del índice de calidad puesto que la diferencia con arqueadura es mínimo).

Según estos resultados la sumatoria de los cuatro índices de calidad (uno por deformación) entrega el índice de calidad total por programa, esto indica que el programa de secado A tuvo un nivel de secado defectuosos con condiciones de secado poco adecuadas; el programa A modificado tuvo un nivel de secado regular con condiciones poco adecuadas;

* Para realizar esta clasificación se adapto los valores limites entregados por la norma chilena NCh 993, presentado estos valores en el anexo I

el programa B tuvo un nivel de secado muy bueno con condiciones de proceso adecuadas; el programa B modificado presento un nivel defectuoso con condiciones de proceso poco adecuadas. El proceso de secado B repetido dio como resultado según su índice de calidad un nivel con condiciones del proceso adecuadas.

Según INFOR (1994), menciona que para madera de renoval de Roble y Raulí de 25 mm. de espesor presentan un índice de calidad de 0,62 y 1,05 respectivamente para programas rápidos, y de 1,13 y 0,95 para programas lentos, comparados con el programa de secado B y B repetido. Puesto que estos dos programas son los mejores para coihue, los programas experimentales exceptuando el programa de secado B repetido que tiene un 0,76 versus un 0,62 en Roble en un programa rápido, tienen resultados mejores que para estos otros Nothofagus, se puede decir por tanto que los resultados en estos dos programas de secado realizados a coihue dieron mejores resultados que programas realizado a Roble y a Raulí.

En el cuadro 3.22 se presentan los resultados para grietas internas grietas superficiales y rajaduras según programa de secado.

Cuadro 3.22 Presencia de ruptura de tejido en las piezas de madera [%] según programa de secado

	Programas de secado				
	A	A.M	B	B.M	B.R
Grietas internas	25,0 (3)	50,0 (6)	50,0 (6)	25,0 (3)	33,3 (6)
Grietas superficiales	33,3 (4)	41,7 (5)	66,7 (8)	58,3 (7)	27,8 (5)
Rajaduras	0,0 (0)	8,3 (1)	8,3 (1)	16,7 (2)	22,2 (4)

Se puede apreciar en el cuadro que en los programas de secado A modificado y B presentan la mayor cantidad de piezas con grietas internas (50%). Las grietas superficiales se presentan en mayormente en los programas B y B modificado, las grietas superficiales fueron evidentes cerca de los nudos; mientras que las rajaduras se presenta en mayor cantidad en las piezas correspondiente al programa B modificado. Por otra parte las grietas en los nudos se encontraron en todos ellos, las cuales no fueron contabilizadas.

Las grietas internas aparecen en mayor numero en proceso de secado acelerado, lo que pone en evidencia que existe una mayor disposición a la aparición de este defecto en programas de tiempo reducido como sucede en el programa A modificado y programa B. Este comportamiento explica también la presencia de grietas superficiales.

El cuadro 3.23 presenta la cantidad de ruptura de tejido leñoso (grietas internas, grietas superficiales y rajaduras) según programa de secado; este cuadro permite asociar la cantidad de estos defectos que estén presente por pieza de madera

Cuadro 3.23: Cantidad de ruptura de tejido leñoso por pieza de madera según programa de secado

	Programas de secado				
	A	A.M	B	B.M	B.R
Grietas internas	6 – 7	4	2	1 – 2	3 – 4
Grietas superficiales	4 – 5	4 – 5	2 – 3	2 – 3	5
Rajaduras	0	1	2	1	1

Se puede visualizar en el cuadro que los programas modificados presentan una leve disminución en la cantidad de grietas internas presentes en las piezas de madera defectuosa; así como las grietas superficiales se mantuvieron iguales entre los programas modificados y programas tentativos. Lo mismo se puede plantear sobre las rajaduras. La repetición del programa de secado B presenta los más altos niveles de cantidad de grietas interna y superficiales y estos valores no concuerdan con los obtenidos en los ensayos preliminares para este mismo programa de secado, a pesar de esto la presencia de este aumento de defecto se da en una menor cantidad de piezas defectuosas

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró llegar al contenido de humedad final deseado, según la clasificación de la Comisión Europea, en el programa B.

El programa B modificado no logró clasificar, es por esto que se recomienda realizar un vaporizado inicial para homogeneizar el contenido de humedad de la madera antes de aplicar el programa.

Los otros programas logran clasificar estando en un nivel S y nivel Q.

La gradiente de humedad en el programa B corresponde a una clasificación exclusiva (E), pero estos dos resultados dependen en gran medida de la madera más que del mismo programa de secado.

Los tiempos de secado fueron diferentes en todos los procesos, por el hecho de ser programa diferentes. El menor tiempo de secado se presentó en el programa A modificado, mientras que el programa que presentó mayor tiempo de secado fue el programa A.

El programa B y su repetición se encuentran dentro de rangos razonables por lo tanto considerados como tiempos bajos de secado.

Según el análisis estadístico, clasificación según Norma Chilena NCh 993 y el índice de calidad de secado, el programa que presentó los mejores resultados en los defectos de alabeos caracterizados, corresponde al programa de secado B.

Estos resultados pueden ser corroborados en gran medida gracias a la repetición del programa de secado B.

En lo que respecta a la ruptura del tejido leñoso, se puede concluir que el programa de secado B no tiene buenos resultados, exceptuando las rajaduras, mientras que la repetición de este programa evidencia una leve disminución de estos problema y un aumento en la rajadura.

El menor tiempo de acondicionado corresponde al obtenido en el programa de secado B.

La repetición de este programa arrojó un mayor tiempo de acondicionado final. A pesar de esto se puede concluir que las tensiones de secado fueron menores en el programa B, debido principalmente a que en este programa se realizan las primeras etapas con una alta humedad relativa del ambiente.

El tiempo de reacondicionado fue igual para todos los programas (6 horas), excepto el programa de secado A el cual no se le realizó este procedimiento, cabe mencionar que este programa generó altos niveles de alabeos; lo cual permite asegurar que un reacondicionado al 18% de contenido de humedad puede beneficiar la disminución de los defectos de alabeos.

La máxima recuperación del colapso se presentó en el programa de secado A modificado, mientras que el programa de secado B y su repetición tuvieron resultados similares entre sí. Se recomienda utilizar las condiciones señaladas en el programa B cuando se aplique él mismo, puesto que la baja recuperación de colapso se debe principalmente a que la madera con este programa no se colapsa fuertemente.

Para otros programas de secado aplicados a madera de renoval de Coihue se recomienda utilizar el reacondicionado aplicado al programa A modificado.

En consecuencia, después de lo expuesto se puede concluir que el mejor programa de secado que se puede aplicar a la madera de renoval de Coihue corresponde al programa de secado B, el cual presentó los mejores resultados en defectos, recuperación de colapso e intensidad de las tensiones internas de la madera.

El tiempo de secado fue mayor pero se puede compensar con los otros resultados.

Se recomienda incluir pesos en la parte superior de la carga a secar, con esto disminuir en una gran medida la presencia de alabeos y además de pintar los extremos para sellar la madera y lograr que esta no pierda humedad excesiva por los extremos, y con esto disminuir la presencia de rajaduras.

5. BIBLIOGRAFÍA

Ananias, R; Hernández, G y Pérez, P. 2007. Estudio experimental del secado de renovales de canelo (*Drimys winteri*). Universidad del Bio – Bio, Concepción. Chile. (11): pp 59-70

Bramahall, G. 1975. Calculating Kiln Schedule changes. Proc 26th ann. Mtg. west. Dry Klin Clubs. Chicago. EE.UU. (5): pp 99-103

CIREN-INFOR. 1994. Atlas Forestal de Chile. Editorial Antártica. Santiago, Chile

Corporación Nacional Forestal, CONAF. 2007. Superficie nacional de bosques [en línea]. <http://www.conaf.cl/?page=home/contents&seccion_id=19266dd808e79a19d6c4d6d70e1bcd28&unidad=0&> [consulta: 28 noviembre 2007].

Gutiérrez, M. 1995. Tecnología del secado de la madera. Proyecto regional de alternativas para la inversión forestal. Chile. 62 p

Instituto Forestal (INFOR). 1994. Informe técnico N° 134: “Secado de madera de renoval de Roble y Raulí” 31 p

Instituto Forestal (INFOR). 1973. Boletín informativo N° 27: “Contracción, colapso y juego de maderas Chilenas” 39 p

Mancilla, L. 2000. Secado artificial de *Nothofagus dombeyi* (Coihue) en Chile. Universidad de Talca. Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal. 83 p.

Montgomery, D 1991. Diseño y Análisis de Experimentos. 3° Edición. Ed. Iberoamericana. México DF. México 589 p.

NCh 176/1 Of 84. Madera – Determinación de humedad. 10 p.

NCh 176/3 Of 84. Madera – Determinación de la contracción radial y tangencial. 9 p.

NCh 993 EOf 72. Madera – Procedimiento y criterios de evaluación para clasificación. 16 p.

Ramírez, J. 2004. Secado convencional en madera juvenil y adulta de *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. Universidad de Chile. Tesis para optar al título de Ingeniero de la madera 94 p.

Rodríguez, R; Matthei, O y Quezada, M. 1983. Flora arbórea de Chile. Ediciones de la Universidad de Concepción. Concepción. 408 p.

Vignote, S y Jiménez, F. 2000. Tecnología de la madera, 3^{ra} edición. Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Madrid. España. 678 p.

APÉNDICE A

Resultado de aplicación del método de los Esfuerzos de secado para la obtención de los programas de secado modificados

El esfuerzo de secado corresponde al producto de la presión saturada diferencial de vapor de agua en los bulbos secos y húmedos y el tiempo que estas temperaturas son mantenidas en la aplicación de una etapa de secado.

Para realizar esta técnica se consideraron las siguientes bases:

1. Se utilizó como base dos programas de secado tentativos, programa A y programa B, los cuales fueron creados basados principalmente en la experiencia.
2. Usando los valores tabulados en el cuadro II.1 (ver anexo II) se sustrajeron los valores de presión de vapor para las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo respectivamente y se multiplico esta diferencia por el tiempo en el cual duro la etapa de secado correspondiente. El producto anterior es el esfuerzo de secado para la etapa de secado correspondiente
3. Para los nuevos programas (programa de secado A modificado y programa de secado B modificado) se procedió a una reducción sistemática de las etapas de secado la cual fue porcentual al tiempo total de aplicación del programa de secado tentativo, para esto solo se considero el programa de secado propiamente tal, no considerado vaporizado inicial, reacondicionado y acondicionado final. Para la realización de los nuevos programas de secado se mantuvieron constante las temperaturas del bulbo seco
4. Se dividió el valor del esfuerzo de secado (constante) por los nuevos tiempos de secado de cada etapa para obtener una nueva diferencia de presión y esto fue restado a la presión de vapor de agua en el bulbo seco (constante) dando como resultado una nueva presión en el bulbo húmedo y por ende una nueva temperatura. Los valores de ajustes se muestran en el cuadro A.1 y A.2 respectivamente.
5. Con los resultados anteriores los nuevos programas de secado son los presentados en los cuadro A.3 y A.4 respectivamente.

Cuadro A.1: Obtención del esfuerzo de secado para el programa de secado A tentativo

Etapa	T _{bs} [°C]	T _{bh} [°C]	P ^o bs [mbar]	P ^o bh [mbar]	ΔP ^o [mbar]	Tiempo [horas]	Esfuerzo [mbar – horas]
Verde - 60	45	43	96	88	8	9,0	72
60 – 40	45	42	96	83	13	48,0	624
40 – 20	50	46	123	102	21	168,0	3528
20 – 15	55	50,5	158	127	31	48,0	1488
15 – 10	55	46	158	102	56	48,5	2716
10 – 8	60	44	199	91	108	48,0	5184

Cuadro A.2: Obtención del esfuerzo de secado para el programa de secado B tentativo

Etapa	Tbs [°C]	Tbh [°C]	P° bs [mbar]	P°bh [mbar]	ΔP° [mbar]	Tiempo [horas]	Esfuerzo [mbar – horas]
Verde – 35	50	48	123	114	9	20,0	180
35 – 25	50	47	123	107	16	24,0	384
25 – 15	50	42	123	83	40	42,0	1680
15 – 8	50	31	123	42	81	44,0	3564

Cuadro A.3: Utilización de los esfuerzo de secado para obtener el programa de secado A modificado

Etapa	Tbs [°C]	Tbh [°C]	P° bs [mbar]	P°bh [mbar]	ΔP° [mbar]	Tiempo [horas]	Esfuerzo [mbar – horas]	Δ tiempo [horas]
Verde – 60	45	43	96	88	8	9,00	72	0,00
60 – 40	45	41	96	78	18	34,67	624	13,33
40 – 20	50	45	123	96	27	130,67	3528	37,33
20 – 15	55	49	158	117	41	36,29	1488	11,71
15 – 10	55	43	158	88	70	38,80	2716	9,70
10 – 8	60	38	199	68	131	39,57	5184	8,43

Cuadro A.4: Utilización de los esfuerzo de secado para obtener el programa de secado B modificado

Etapa	Tbs [°C]	Tbh [°C]	P° bs [mbar]	P°bh [mbar]	ΔP° [mbar]	Tiempo [horas]	Esfuerzo [mbar – horas]	Δ tiempo [horas]
Verde – 35	50	47	123	107	16	11,25	180	8,75
35 – 25	50	43	123	88	35	10,97	384	13,03
25 – 15	50	37	123	64	59	28,47	1680	13,53
15 – 8	50	31	123	42	81	44,00	3564	0,00

La disminución de los tiempos de secado para estos nuevos programas solo son teóricos, ya que el tiempo que demore cada etapa de secado dependerá netamente del comportamiento que adopte la madera frente a los programas de secado.

APÉNDICE B

Valores utilizados para realizar el Análisis de varianza

En el caso de los valores utilizados para acanaladura, encorvadura, arqueadura y torcedura se utilizó $\text{Log}(\text{defecto}/\text{ancho pieza})$ esto se realizó para lograr que los datos de estos cuatro defectos cumplieran con la normalidad, homocedasticidad e independencia de los datos necesarios para poder realizar un análisis de VARIANZA

Cuadro B.1: Valores utilizados según programa para el defecto de acanaladura

Programa de secado			
A	A.M	B	B.M
-1,668970	-1,67063	-2,07246	-1,90611
-1,323966	-2,05808	-1,85893	-1,71484
-1,573595	-1,44216	-1,77516	-2,1636
-1,546095	-2,09114	-1,80115	-1,82602
-1,838056	-1,83127	-2,08451	-1,73901
-1,594528	-1,94854	-1,96994	-1,90157
-1,691170	-1,94793	-1,74263	-1,87168
-1,541736	-2,42896	-1,60847	-1,54294
-1,456307	-1,94909	-1,75191	-1,72777
-2,214441	-2,09102	-1,91991	-1,72184
-1,806208	-2,20742	-1,88967	-1,76072
-1,696821	-2,17971	-2,16238	-1,66534

Cuadro B.2: Valores utilizados según programa para el defecto encorvadura

Programa de secado			
A	A.M	B	B.M
-1,39662	-0,94503	-1,43648	-1,69137
-1,73834	-1,29062	-1,1852	-1,48877
-1,37068	-0,73141	-1,01758	-0,75876
-1,62558	-1,26166	-1,23326	-1,05561
-0,97511	-1,30237	-1,53339	-1,17795
-0,68765	-1,52221	-1,20402	-0,57579
-0,62076	-1,56258	-1,60022	-0,98087
-1,67227	-1,46982	-1,27638	-1,06409
-1,04852	-1,30402	-1,32515	-1,1622
-0,72644	-1,33036	-1,76849	-0,80222
-1,31771	-1,278	-1,0932	-0,27796
-0,99672	-1,33884	-1,6069	-1,37824

Cuadro B.3: Valores utilizados según programa para el defecto arqueadura

Programa de secado			
A	A.M	B	B.M
-1,14916	-1,34554	-1,70449	-1,47467
-0,82497	-1,14056	-1,28913	-1,49436
-1,07537	-1,07799	-1,18459	-1,15956
-0,96903	-1,18061	-1,41951	-1,20627
-1,16216	-1,20467	-1,26232	-1,41142
-1,12534	-1,08916	-1,44706	-1,08448
-0,96241	-1,46203	-1,20438	-1,358
-0,74334	-1,49902	-0,98421	-1,22462
-0,95614	-1,20268	-1,47199	-1,11932
-0,83699	-1,0391	-1,28145	-1,38795
-0,85768	-1,53352	-1,03569	-0,97827
-0,77409	-1,31709	-1,41604	-1,24826

Cuadro B.4: Valores utilizados según programa para el defecto torcedura

Programa de secado			
A	A.M	B	B.M
-1,37476	-1,19655	-1,65889	-1,48625
-1,06339	-1,5057	-1,17747	-1,31978
-0,96261	-1,12406	-1,1836	-1,38352
-1,4346	-1,69351	-1,13235	-1,60453
-1,07799	-1,41941	-1,40954	-1,00654
-0,90369	-1,31768	-1,27278	-1,0614
-0,86526	-1,6604	-1,32628	-1,29067
-1,26142	-1,60995	-0,90419	-1,19173
-0,80261	-1,48205	-1,41151	-1,17883
-0,95344	-1,66541	-1,54327	-1,18502
-0,83176	-1,57592	-1,57613	-1,19265
-1,33904	-1,25683	-1,72641	-1,52902

Cuadro B.5: Valores utilizados según programa para el defecto grietas internas

Programa de secado			
A	A.M	B	B.M
10	0	0	2
3	5	0	0
0	4	0	0
0	1	1	0
0	0	2	0
0	6	2	0
0	8	3	0
0	0	1	1
7	0	0	0
0	0	3	0
0	0	0	0
0	1	0	1

Cuadro B.6: Valores utilizados según programa para el defecto grietas superficiales

Programa de secado			
A	A.M	B	B.M
1	2	0	0
5	1	1	0
1	0	2	3
0	1	1	0
0	0	3	0
0	12	0	2
0	7	10	2
0	0	2	5
11	0	1	0
0	0	1	1
0	0	0	1
0	0	0	4

Cuadro B.7: Valores utilizados según programa para el defecto rajadura

Programa de secado			
A	A.M	B	B.M
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	1
0	0	2	0
0	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

APÉNDICE C

Errores de estimación del contenido de humedad final para cada uno de los programas de secado aplicados

En las cargas correspondiente se midieron los resultados relativos al contenido de humedad final después del proceso de acondicionado final. Para este control de humedad se realizó de dos formas una primera forma la cual corresponde a el contenido de humedad de las muestras testigos y una segunda correspondiente a la forma gravimétrica a cada una de las piezas que conforman la carga; es por esto que existe un error de estimación de la humedad final el cual es presentado en el cuadro C.1

Cuadro C.1: Porcentaje de error de la estimación de contenido de humedad final por medio de las muestras de control.

	Programa de secado				
	A	A.M	B	B.M	B.R
CH [%] final*	9,4	8,9	8,7	10,9	8,9
CH [%] final†	8,4	9	8,5	9	8,9
Error [%]	10,6	1,1	2,3	17,4	0,0

* Determinación de contenido de humedad mediante método gravimétrico

† Determinación de contenido de humedad mediante muestras de control

APÉNDICE D

Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y bulbo húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio de la madera a través del tiempo

Cuadro D.1: Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio para el programa de secado A.

Tiempo [Horas]	CH [%]	Tbs [° C]	Tbh [° C]	HR [%]	Cheq [%]
0,0	63,5	45	42	83	17
12,0	52,7	45	42	83	17
12,0	52,7	45	43	88	20
21,0	48,1	45	43	88	20
21,0	48,1	45	42	83	17
45,5	42,6	45	42	83	17
69,0	38,4	45	42	83	17
69,0	38,4	50	46	78	15
93,0	33,0	50	46	78	15
117,5	28,9	50	46	78	15
141,0	25,6	50	46	78	15
165,0	24,4	50	46	78	15
189,0	22,9	50	46	78	15
213,0	21,1	50	46	78	15
237,0	19,8	50	46	78	15
237,0	19,8	55	51	76	13
261,0	17,9	55	51	76	13
285,0	16,4	55	51	76	13
285,0	16,4	55	46	59	9
309,0	14,8	55	46	59	9
333,5	11,4	55	46	59	9
333,5	11,4	60	44	40	6
357,5	9,8	60	44	40	6
381,5	7,5	60	44	40	6
381,5	7,5	60	56	81	14
389,5	8,4	60	56	81	14

Cuadro D.2: Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio para el programa de secado A modificado.

Tiempo [Horas]	CH [%]	Tbs [° C]	Tbh [° C]	HR [%]	Cheq [%]
0,0	44,0	45	42	83	17
12,0	35,1	45	42	83	17
12,0	35,1	50	45	75	13
28,7	23,3	50	45	75	13
50,2	17,2	50	45	75	13
50,2	17,2	84	83	96	22
56,2	18,6	84	83	96	22
56,2	18,6	55	49	72	11
74,7	15,0	55	49	72	11
74,7	15,0	55	43	50	8
100,2	9,0	55	43	50	8
100,2	9,0	60	38	26	5
103,2	8,0	60	38	26	5
103,2	8,0	60	56	81	14
113,2	9,0	60	56	81	14

Cuadro D.3: Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio para el programa de secado B.

Tiempo [Horas]	CH [%]	Tbs [° C]	Tbh [° C]	HR [%]	Cheq [%]
0,0	42,0	50	48	89	20
20,0	31,1	50	48	89	20
20,0	31,1	50	47	81	15
44,0	24,1	50	47	81	15
44,0	24,1	50	42	62	10
63,5	16,8	50	42	62	10
63,5	16,8	50	49	93	23
69,5	18,0	50	49	93	23
69,5	18,0	50	42	62	10
92,0	13,2	50	42	62	10
92,0	13,2	50	31	21	4
116,5	10,0	50	31	21	4
136,0	8,3	50	31	21	4
136,0	8,3	50	46	79	15
140,0	8,5	50	46	79	15

Cuadro D.4: Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio para el programa de secado B modificado.

Tiempo [Horas]	CH [%]	Tbs [° C]	Tbh [° C]	HR [%]	Cheq [%]
0,0	52,2	50	47	81	15
19,5	40,2	50	47	81	15
43,5	32,8	50	47	81	15
43,5	32,8	50	43	65	11
68,5	24,7	50	43	65	11
68,5	24,7	50	37	43	7
91,5	19,2	50	37	43	7
115,0	17,5	50	37	43	7
115,0	17,5	50	49	93	23
121,0	19,8	50	49	93	23
121,0	19,8	50	37	43	7
142,0	15,7	50	37	43	7
142,0	15,7	50	31	21	4
166,0	13,1	50	31	21	4
191,0	7,5	50	31	21	4
191,0	7,5	50	46	79	15
201,0	9	50	46	79	15

Cuadro D.5: Variación de contenido de humedad, temperatura bulbo seco y húmedo, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio para el programa de secado B repetido.

Tiempo [Horas]	CH [%]	Tbs [° C]	Tbh [° C]	HR [%]	Cheq [%]
0,0	48,4	50	48	89	20
20,5	34,8	50	48	89	20
20,5	34,8	50	47	81	15
42,5	28,2	50	47	81	15
42,5	28,2	50	42	62	10
66,5	22,8	50	42	62	10
89,0	16,3	50	42	62	10
89,0	16,3	50	49	93	23
95,0	17,7	50	49	93	23
95,0	17,7	50	42	62	10
113,5	14,0	50	42	62	10
113,5	14,0	50	31	21	4
136,5	9,7	50	31	21	4
160,5	7,8	50	31	21	4
160,5	7,8	50	46	79	15
171,5	8,9	50	46	79	15

APÉNDICE E

Determinación de la recuperación del colapso

Para determinar la recuperación de colapso se tuvo que crear una formula para poder estimar este valor, para esto se consideraron las siguientes premisas:

1. La contracción normal de la madera se considero como la recta formada con las contracciones después de aplicar el reacondicionado y la contracción final al terminar el proceso de secado
2. La contracción total de la madera se considera como la recta que pasa por la contracción calculada antes de aplicar el reacondicionado, esta recta es paralela a la recta de la contracción normal.
3. la recuperación del colapso se determina como la razón de la contracción por colapso y la contracción total. La contracción por colapso corresponde a la resta entre la contracción total y la contracción normal.

Sea:

X: CH antes del reacondicionado

Y: CH después del reacondicionado

Z: CH al final del programa de secado

Cx: contracción antes del reacondicionado con un CH = X

Cy: contracción después del reacondicionado con un CH = y

Cz: contracción al final del programa de secado

Ct: contracción total

Cn: contracción normal

Cc: contracción por colapso

$$C - C_y = -\left(\frac{C_y - C_z}{Y - Z}\right) \times (CH - Y) + C_y \quad CH=0 \Rightarrow C = C_n$$

$$C_n = -\left(\frac{C_y - C_z}{Y - Z}\right) \times Y + C_y$$

Para que las rectas de contracción normal y contracción total sean paralelas sus pendientes deben ser iguales, por tanto:

$$\frac{C_y - C_z}{Y - Z} = \frac{-C_t + C_t}{-X + 0}$$

$$C_t = -\frac{C_y - C_z}{Y - Z} \times X + C_x$$

$$C_c = C_t - C_n$$

$$C_c = -\frac{C_y - C_z}{Y - Z} \times X + C_x + \frac{C_y - C_z}{Y - Z} \times Y - C_y$$

$$C_c = \frac{C_y - C_z}{Y - Z} \times (Y - X) + C_x - C_y$$

$$RC[\%] = \frac{C_c}{C_t} \times 100 = \frac{\frac{C_y - C_z}{Y - Z} \times (Y - X) + C_x - C_y}{-\left(\frac{C_y - C_z}{Y - Z}\right) \times X + C_x} \times 100$$

Cuadro E.1: Resultados de las distintas contracciones medidas a través del ciclo de secado

Programa	Contracción antes reacondicionado	Contracción después reacondicionado	Contracción al final secado	Contracción colapso	Contracción total
A	0	0	11,0	0	0
A.M	4,0	1,7	4,0	2,0	7,8
B	2,6	1,6	3,6	0,8	6,0
B.M	4,2	3,3	5,2	0,6	6,9
B.R	3,3	1,9	4,8	0,9	8,0

ANEXO I

Especificaciones de calidad de secado según normas

A. uniformidad del contenido de humedad final

Los cuadros I.1 y I.2 especifican para un nivel de confianza del 90%, la desviación permitida del Contenido de Humedad promedio y del gradiente de humedad entre la superficie y el centro de una muestra.

Cuadro I.1: Desviación admisible del CH final promedio respecto del CH final esperado

Calidad	Máxima desviación del CH promedio
S (estándar)	3%
Q (secado calidad)	2%
E (exclusivo)	1,50%

Fuente: Ramírez, 2004

Cuadro I.2: Desviación admisible del gradiente de CH en el espesor de la pieza

Calidad	máxima gradiente del CH final
S (estándar)	$8\% \cdot 0,4 = 3\%$
Q (secado calidad)	$8\% \cdot 0,3 = 2\%$
E (exclusivo)	$8\% \cdot 0,3 = 1,60\%$

Fuente: Ramírez, 2004

B. Deformaciones

Cuadro I.3: Especificaciones de flecha máxima * [mm] para acanaladura

Intensidad de deformación				
A	B	C	D	E
0	$0,02 \cdot a$	$0,04 \cdot a$	$0,06 \cdot a$	$0,08 \cdot a$

Fuente: Norma chilena NCh 993

Cuadro I.4: Especificaciones de flecha máxima [mm] para distintas intensidades de encorvadura según ancho de la pieza [mm] y un largo de 2,44 m

Intensidad de deformación	Anchos [mm]				
	76	102	127	152	178
A	0	0	0	0	0
B	6	5	3	3	3
C	11	9	6	6	5
D	17	14	9	9	8

Fuente: Norma Chilena NCh 993

* a: ancho de la pieza

Cuadro I.5: Especificaciones de flecha máxima [mm] para distintas intensidades de arqueadura según espesor de la pieza [mm] y un largo de 2,44 m

Intensidad de deformación	Espesor [mm]			
	26,42	26,83	27,32	30,3
A	0	0	0	0
B	16,33	16,15	16,05	14,55
C	31,81	31,45	31,03	28,51
D	48,14	47,60	46,96	43,06

Fuente : Norma Chilena NCh 993

Cuadro I.6: Especificaciones de flecha máxima* [mm] para distintas intensidades de torcedura según espesor de la pieza [mm] y un largo de 2,44 m.

Intensidad de deformación	Espesor [mm]			
	26,42	26,83	27,32	30,3
A	0	0	0	0
B	0,07*a	0,07*a	0,06*a	0,06*a
C	0,13*a	0,12*a	0,12*a	0,11*a
D	0,20*a	0,19*a	0,19*a	0,17*a

Fuente: Norma Chilena NCh 993

Cuadro I.7: Valores admisibles [mm] para el índice de calidad de secado, según nivel de deformación†, para piezas de madera con medidas de 1" x 5" x 1,8 m

Deformación	Nivel de deformación			
	Na	Nb	Nc	Nd
Acanaladura	0 – 2,6	2,6 – 5,2	5,2 – 6,6	> 6,6
Encorvadura	0 – 3	3 – 6	6 – 7	> 7
Arqueadura	0 – 11	11 – 22	22 – 25,6	> 25,6
Torcedura	0 – 7	7 – 12,6	12,6 – 16	> 16

Fuente: INFOR, 1994

* a: ancho de la pieza

† Na: n° piezas sin defecto

Nb: n° piezas con defecto leve

Nc: n° piezas con defecto moderado

Nd: n° piezas con defecto severo

Cuadro I.8: Atributos de calidad de secado según índice de calidad

Nivel de secado	Índice [mm]	Condiciones de secado
Excelente	0,0	
Muy bueno	0,1 – 0,5	Adecuadas
Bueno	0,51 – 1	
Satisfactorio	1,1 – 1,5	Poco adecuadas
Regular	1, 51 – 2,0	
Defectuoso	2,1 – 3,0	
Mala	3,1 – 5,0	inadecuadas
Muy mala	> 5,0	

Fuente: Ananías *et al*, 2007

ANEXO II

Consideraciones al método de esfuerzo de secado

Cuadro II.1: Presiones de vapor de agua [mili bar], según temperatura [°F], dentro de una cámara de secado.

°F	variación en la unidad									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	66	68	70	72	74	76	78	81	83	85
110	88	91	93	96	99	102	104	107	110	114
120	117	120	123	127	130	134	138	141	145	149
130	153	158	162	166	171	175	180	184	189	194
140	199	204	210	215	221	225	232	238	244	250
150	257	263	269	276	283	290	297	304	312	319
160	327	335	343	351	360	368	377	386	395	404
170	413	423	433	443	453	463	474	425	496	507
180	518	530	541	554	566	578	591	604	617	630
190	644	658	672	687	701	716	731	747	763	779
200	796	812	828	846	863	881	899	917	936	955
210	974	994	1014	1034	1054	1075	1097	1118	1140	1163
220	1185	1208	1232	1256	1280	1304	1329	1355	1380	1407
230	1433	1460	1487	1515	1543	1572	1601	1631	1661	1691

Fuente: Bramahall, 1975

Puesto que las temperaturas están en ° F ahí que transformarlas en ° C, para esto se utilizo la siguiente formula matemática

$$C = \frac{5}{9} \times (F - 32)$$

Donde: C = Temperatura en ° C
F = Temperatura en ° F