

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPTO. ING. EN MADERAS**

Profesor Patrocinante:  
Dr. Rubén Ananías.



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**"Comportamiento del pino radiata frente al secado convencional y bajo vacío: Estudio de la cinética y la calidad del secado".**

Seminario de Titulación presentado en conformidad a los requisitos para la obtención del título de Ingeniero de Ejecución en Maderas

**SERGIO JAVIER VALLEJOS DIAZ**

Concepción, Noviembre 2003.

## INDICE

	<b>Paginas.</b>
<b>1.0 INTRODUCCION.</b>	<b>4</b>
1.1. Objetivos generales.	5
1.2. Objetivos específicos.	5
<b>2.0 ANTECEDENTES GENERALES.</b>	<b>6</b>
2.1 Aspectos teóricos cinética de secado.	6
2.2 Bases físicas del secado bajo vacío.	9
<b>3.0 MATERIAL Y METODO.</b>	<b>11</b>
3.1 MATERIAL.	11
3.1.1 Madera.	11
3.1.2 Equipos.	11
3.2 MÉTODO	11
3.2.1 Condiciones experimentales.	12
3.2.2 Preparación de la madera	13
3.2.3 Controles antes, durante y después del proceso	15
3.3 Cinética del secado convencional	18

3.4	Cinética del secado bajo vacío	20
3.5	Calidad del programa de secado	23
<b>4.0</b>	<b>ANALISIS Y RESULTADOS</b>	<b>29</b>
4.1	Cinética secado convencional	29
4.2	Cinética secado bajo vacío	32
4.3	Calidad de secado convencional	34
4.4	Calidad de secado bajo vacío	45
4.5	Variación dimensional	49
<b>5.0</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>52</b>
<b>6.0</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>52</b>
<b>7.0</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>53</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>55</b>

**Anexo 1:** Descripción equipos de secado

## RESUMEN

En el presente trabajo se analiza el comportamiento durante el secado de la madera de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don). Se estudia la cinética del secado convencional, se explora la evolución de la humedad durante el secado bajo vacío en atmósfera de vapor sobrecalentado; además se evalúa la calidad de la madera seca.

El estudio de la cinética del secado convencional es basado en la determinación del coeficiente global de transferencia de masa ( $K_x$ ), mientras que para el secado bajo vacío se realiza un estudio de la velocidad de secado basado en mediciones experimentales de evolución de la masa y la temperatura de la madera..

Para el secado convencional se realizaron tres ensayos, bajo un programa de secado constante 70°C/60°C (T/TH), y un ensayo bajo vacío con un programa 70°C/9% (T/CHE) y una presión de 0.2 bar.

Los resultados muestran que la cinética del secado convencional del pino radiata puede ser representada sobre la base de un coeficiente global de secado. La magnitud de este coeficiente es del orden de  $6.5 \cdot 10^{-5}$  (kg/m<sup>2</sup>·s). En el secado bajo vacío, es observada una etapa inicial de secado constante con una duración de 11 h, un contenido de humedad crítico de 58% y una velocidad de secado máxima 1.45 (%/h).

En relación con la calidad de la madera seca de pino radiata de 25 mm de espesor, en el secado convencional resulta una buena calidad de la madera, y en secado bajo vacío la calidad obtenida es satisfactoria.

## INTRODUCCIÓN

El creciente aumento del sector maderero en el país ha tenido como principal protagonista al pino radiata (*Pinus radiata* D. Don). Oriunda de la región occidental de los Estados Unidos, es una especie forestal ampliamente conocida; la que pese a tener una distribución natural muy reducida, se encuentra plantada en diversos países del mundo. Introducida en Chile a fines del siglo pasado, las plantaciones masivas sólo se iniciaron en la década de los 40. En 1965 la superficie plantada alcanzaba a unas 230.000 ha, en 1984 llega al millón de hectáreas y actualmente una superficie cercana a las 1.500.000 ha. Del total de plantaciones de actitud forestal, el 76% de las plantaciones forestales chilenas corresponden a la especie pino radiata, estando el 88% de éstas distribuidas entre la VI y IX regiones, con un 52% presente en la región del Bío-Bío (Infor 2003).

El secado artificial de la madera es un tema estratégico para las empresas del sector forestal ya que los usos racionales de madera verdes son cada vez más reducidos. Las cifras así lo demuestran, de cada 10 pedidos o productos nuevos, ocho son solicitados secos. El promedio de secado de pino a escala nacional esta en alrededor del 50%. (Lignum, 2002).

El secado convencional permite alcanzar contenidos de humedad final tan bajos como sean requeridos, en función del uso final de la madera. Sin embargo el secado vacío, permite reducir de 5 a 10 veces los tiempos de secado, mínimas pérdidas de energía y calor al trabajar en autoclave sellado herméticamente, además de una mejora sustancial en la calidad del producto final.

El conocimiento de la cinética del secado, permite predecir la variación temporal del contenido de humedad, es decir el contenido de humedad final para cualquier instante de tiempo, el tiempo de duración del proceso, velocidad de secado, lo cual apoya la toma de decisiones en la conducción y optimización del proceso de secado.

## **OBJETIVOS**

### **1.1. Objetivos Generales**

- Estudiar la cinética del secado convencional.
- Explorar la evolución de la humedad durante el secado bajo vacío en vapor sobrecalentado.
- Evaluar la calidad del secado de la madera.

### **1.2. Objetivos específicos**

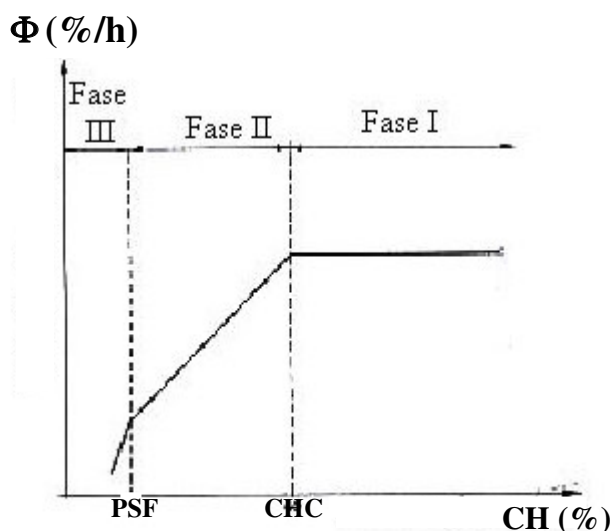
- Determinación de curvas de secado convencional experimental y teóricas basada en el coeficiente global de secado.
- Evaluación de la velocidad del secado experimental del secado bajo vacío.
- Evolución de la temperatura y las presiones de vapor durante el secado bajo vacío.
- Mediciones de alabeos, tensiones, gradiente de humedad y contracción en ambos métodos de secado.

## CAPITULO 2: ANTECEDENTES GENERALES.

### 2.1 CINÉTICA DE SECADO: ASPECTOS TÉORICOS.

La cinética del secado de madera, es la representación de la evolución de las condiciones ambientales y de la madera en el transcurso del secado. En particular la evolución temporal de la humedad de la madera o de la velocidad del secado respecto del tiempo o la humedad de la madera, son las cinéticas del secado más reconocidas.

Teóricamente la velocidad del secado  $\Phi$  de la madera puede ser representada por 3 etapas de secado (Figura 1).



**Figura 1:** Curva velocidad de secado de la madera  
(Fuente: Alvarez y Fernández, 1992)

La primera etapa (Fase I) se observa al inicio del secado a partir de un contenido de humedad elevado, con velocidad de secado constante, dependiente de las condiciones del ambiente ( $T$ ,  $v$ ,  $HR$ ). La temperatura del aire  $T$  incrementa la velocidad de evaporación del agua desde la superficie de la madera y además estimula el flujo interno de humedad en la madera. El desplazamiento del aire y por ende su velocidad  $v$ , facilita la evacuación del

aire húmedo, permitiendo poner en contacto nuevamente la superficie de la madera, con aire de mayor capacidad secante. Por otra parte, la humedad relativa indica el grado de saturación del aire determinando la mayor o menor capacidad secante del ambiente.

En esta etapa predominan fenómenos de transferencia de calor y evaporación superficial, es decir, la evaporación ocurre en la superficie de la madera y todo el calor aportado se utiliza para evaporar el agua. La temperatura y la presión de vapor en la superficie corresponden a la TH y a la presión de saturación respectivamente. El movimiento interno de agua líquida llega hasta superficie de la madera donde se evapora. Esta etapa constante finaliza cuando aparecen zonas secas en la superficie de la madera. El contenido de humedad en esta condición se denomina contenido de humedad crítico, donde más allá de este punto la temperatura de la superficie de la madera tiende a ser la temperatura del ambiente. La segunda etapa (Fase II), corresponde a al etapa de secado con velocidad de secado decreciente. Este periodo puede durar un tiempo mayor que el de la etapa anterior, aunque la cantidad de agua removida es menor. Con algunas zonas secas en la superficie de la madera, la presión de vapor se hace inferior a la de saturación y la temperatura aumenta, alejándose de la temperatura de bulbo húmedo, a la cual tendió en la primera etapa.

La velocidad de secado por unidad de superficie total, disminuye en forma lineal, hasta que la superficie de la madera se seca completamente, producto de que la velocidad de evaporación superficial, supera la velocidad de transporte de humedad desde el interior.

De lo anterior se tiene la presencia de dos zonas, una superficial en el dominio higroscópico, donde la migración de humedad esta regida por la difusión de vapor y agua líquida y una zona interior donde el agua libre migra por capilaridad.

La etapa a velocidad de secado decreciente implica el surgimiento de un frente de evaporación por debajo de la superficie el cual se desplaza hasta el centro de la madera. Ciertas evidencias experimentales dejan bastante dudas sobre la presencia de este frente de evaporación para el caso del secado bajo vacío (Neumann et al., 1992). Cuando toda la madera queda bajo el rango higroscópico (Fase III), nace teóricamente la tercera etapa de secado decreciente. En esta última etapa el secado es gobernado por el movimiento



difusional, para el caso del secado convencional y el movimiento convectivo (permeabilidad) juega un rol importante en el caso del secado bajo vacío.

La velocidad del secado en este caso puede ser representada por la relación

$$\Phi = f(\text{CHR}) \cdot \Phi_{\text{Max}} \quad (1)$$

Con  $f(\text{CHR})=1$  si  $\text{CH}>\text{CHC}$   
o  $f(\text{CHR})=\text{CHR}$  si  $\text{CH}<\text{CHC}$ .

El contenido de humedad reducido CHR es definido como

$$\text{CHR} = \frac{\text{CH} - \text{CHE}}{\text{CHC} - \text{CHE}} \quad (2)$$

Y la velocidad máxima  $\Phi_{\text{MAX}}$  se calcula como

$$\Phi_{\text{MAX}} = \frac{h}{\Delta h} \cdot (T - T_s) \quad (3)$$

Por otra parte, de acuerdo a Karabagli et al. (1997) y Chrusciel et al. (1999), la velocidad del secado  $\Phi$  queda representada por la diferencia entre la humedad de la madera **CH** y el contenido de humedad de equilibrio de ésta con el ambiente **CHE** (ecuación 1). En este contexto la constante de proporcionalidad **k** es denominada coeficiente global de transferencia de materia (modelo coeficiente global de secado).

$$\Phi = k \cdot (\text{CH} - \text{CHE}) \quad (4)$$

El coeficiente global de secado k incluye el movimiento interno de humedad a través de la madera y la transferencia de humedad desde la superficie de la madera hacia el aire de secado. Consecuentemente este depende tanto de las características de la madera sometida a secado así como también de los parámetros de las condiciones de secado (coeficientes

globales de transferencia de humedad y calor). El coeficiente global de secado puede ser obtenido por la correlación siguiente (Ananíás et al., 2001)

$$\frac{1}{k} = \left[ \exp\left(\frac{2683}{T}\right) \right] \cdot \left[ 0.12 \cdot e + 23.9 \cdot v^{-0.8} \exp\left(\frac{-(1-HR)}{PSF - CHE}\right) \right] \quad (5)$$

## 2.2 BASES FÍSICAS DEL SECADO BAJO VACÍO

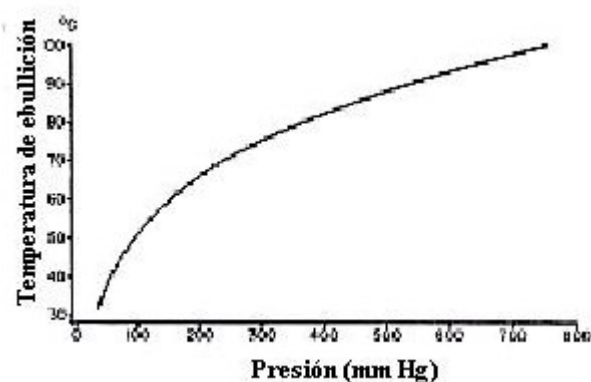
El secado bajo vacío permite un aumento en el transporte de humedad interno en la madera, sin necesidad de elevar la temperatura de secado. Esto se logra a través de una disminución de la presión al interior del autoclave, de tal forma que la temperatura del agua contenida en la madera alcance su punto de ebullición (Perré et al., 1995).

La temperatura que existe justo encima del líquido durante la ebullición se denomina temperatura o punto de ebullición y corresponde a aquella para la cual la tensión máxima de vapor es igual a la presión exterior. En estas circunstancias el valor de la presión exterior influye directamente en el punto de ebullición. Esta ebullición generará una sobrepresión interna, producto de la rápida intensificación en la evaporación del agua presente en la superficie de la madera, aumentando considerablemente la fuerza conductora de humedad. Al inicio del secado (Fase I) se tiene una fuerte evaporación superficial, con lo cual aumenta el gradiente entre la temperatura ambiente y de la madera, ya que la superficie de la madera se enfría más rápido que el centro a causa de la intensa evaporación, trayendo consigo un aumento en la velocidad de secado.

En momentos más avanzados del secado (Fase II), cuando el contenido de humedad de la madera es inferior al contenido de humedad crítico, la presión interna es mayor que la presión de saturación bajo las mismas condiciones de secado, lo que implicaría la ausencia del frente de vaporización (Neumann et al., 1992). En adición, bajo vacío la presión gaseosa interna estimula al flujo interno, como consecuencia de un mecanismo de flujo deslizante que favorece la permeabilidad gaseosa a baja presión (Perré et al., 1995).

Sin embargo el principal problema que se presenta en el secado bajo vacío es la transferencia de calor a la madera. Perré (1995) muestra que bajo vacío las correlaciones del transporte convectivo son restringidas por la baja presencia de aire. Las interrelaciones entre las propiedades térmicas son mantenidas a baja presión, no obstante el flujo másico varía con la presión. Luego para poder entregar el calor adecuado a la madera, se recurre a diversas técnicas tales como calentamiento por convección, con vapor sobrecalentado como medio de transferencia. Entonces, bajo vacío en ambiente sobrecalentado el calentamiento es de tipo convectivo. En este caso se aumenta la velocidad del fluido, para mejorar el transporte de calor y masa.

La presión influye sobre la temperatura de ebullición del agua y en el grado de excitación molecular. Conforme la presión disminuye también lo hace el punto de ebullición del agua de forma de hacer hervir agua por debajo de 100°C. Así por ejemplo, bajo una presión de 60 mmHg el agua hierve a 40°C (Figura 2).



**Figura 2:** Curva evolución de la temperatura de ebullición con la presión

(Fuente: Alvarez y Fernández, 1992)

De esta forma la velocidad de circulación de humedad interior se ve fuertemente acelerada sin los riesgos que se corren al emplear temperaturas elevadas, factor que se ve potenciado en especies de alta permeabilidad. Así por ejemplo, bajo una presión de 60 mm Hg la velocidad de circulación de humedad interior es, aproximadamente, cinco veces mayor que a presión atmosférica, propiedad en la cual se sustenta el secado bajo vacío.

## **CAPITULO 3: MATERIAL Y METODO**

### **3.1 MATERIAL.**

#### **3.1.1 Madera:**

Las piezas de pino radiata que se utilizaron para este estudio fueron, de escuadría 25 x 100 x 1000 (mm) para ensayo 1 y de 50 x 100 x 1000 (mm) para ensayo 2 y 3 en secado convencional y de 25 x 100 x 1500 (mm), para el secado bajo vacío, con un volumen total de madera aproximado de 1 (m<sup>3</sup>) en cortes radial, tangencial y mixtos.

#### **3.1.2 Equipos:**

Se utilizan una planta de secado convencional y un autoclave piloto localizados en el pabellón FONDEF de la Universidad del Bío-Bío, sede Concepción (Anexo 1).

### **3.2. METODO.**

Se estudiaron 3 ensayos de secado convencional y 1 de secado bajo vacío. Un ensayo bajo ambos métodos fue realizado directamente por el autor y se recogieron los datos experimentales de otros 2 ensayos de secado convencional, de información de laboratorios del curso secado de la madera realizados el primer y segundo semestre del 2002.

#### **3.2.1. CONDICIONES EXPERIMENTALES.**

##### **3.2.1a. Condiciones experimentales secado convencional.**

El trabajo experimental se llevó a cabo en un secador de tipo convencional de aproximadamente 0.3 (m<sup>3</sup>) de capacidad efectiva. En el caso del ensayo 1 realizado para secado convencional se trabajo con un programa 70/60 (°C/°C), con temperaturas de trabajo de 70 (°C) para el bulbo seco (TBS) y 60 (°C) para el bulbo húmedo (TBH), con una

diferencia sicrométrica de 10 (°C) y una velocidad del aire del orden de los 3 (m/s). A estas temperaturas le corresponde una humedad relativa de aproximadamente 62 (%), por lo que la madera alcanza un contenido de humedad de equilibrio aproximado de 8.6 (%). Las variables a controlar en el transcurso del proceso de secado se pueden separar en relación con la evolución de este en el tiempo, teniéndose inicialmente la medición de la masa, dimensiones y alabeos de la carga; durante el proceso la medición de la temperatura, mediante la utilización de 3 pares de termocuplas, cuyos valores son recogidos mediante un sistema de adquisición de datos MAC-48 conectado a una computadora. Para el control de la variación del contenido de humedad de la madera y variación dimensional, se trabajo con 4 muestras testigos que fueron controladas (pesadas y medidas), diariamente.

Finalizado el secado se extraen las piezas del interior de la cámara y se determina la masa, dimensiones, alabeos, gradiente, tensiones y contenido de humedad determinado con xilohigrómetro digital Wagner L612, valor necesario para la determinación de la masa anhidra.

**Cuadro N°1: Resumen condiciones experimentales secado convencional.**

<b>Secado Convencional</b>	<b>TBS/TBH (°C/°C)</b>	<b>CHE (%)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	<b>Velocidad del Aire (m/s)</b>	<b>Termocuplas (pares)</b>
<b>Ensayo 1</b>	70/60	8.6	62	3	3
<b>Ensayo 2</b>	70/60	8.6	62	3	6
<b>Ensayo 3</b>	70/60	8.6	62	3	2

### 3.2.1b. Condiciones experimentales secado bajo vacío.

El trabajo experimental se llevó a cabo en un autoclave de 0.3 m<sup>3</sup> de capacidad efectiva. Para el ensayo de secado por vacío se trabajó con una temperatura constante de 70°C, una presión de vapor de 0,2 bar (inicialmente), tratando de mantener un vacío del 20% y humedad de equilibrio del 9 %, durante todo el proceso. Para el control del contenido de humedad de la madera y variación dimensional se utilizaron 4 muestras testigo, además fueron controlados diariamente y cada media hora la temperatura, presión, contenido de humedad de equilibrio, de modo de controlar y mantener las condiciones en el autoclave.

**Cuadro N° 1.1: Resumen condiciones experimentales secado bajo vacío.**

<b>Secado Bajo Vacío</b>	<b>T (° C)</b>	<b>Presión (bar)</b>	<b>Vacío (%)</b>	<b>CHE (%)</b>	<b>Termocuplas (unidades)</b>
<b>Ensayo 1</b>	70	0.2	20	9	7

### 3.2.2. PREPARACIÓN DE LA MADERA.

En esta etapa se llevó a cabo la selección de las piezas necesarias para efectuar el secado tanto en cámara convencional como en autoclave para vacío.

#### **Descripción:**

#### **3.2.2a Secado convencional:**

La selección de las piezas que ingresan a la cámara para el ensayo 1 fueron 99 con una escuadría de 25 x 100 x 1000 mm. , de las cuales se escogen 4 muestras testigos, las que permiten realizar controles de contenido de humedad, masa, tensiones, gradientes y variación dimensional.

**Cuadro N° 2: Resumen preparación madera secado convencional**

(N° de ensayos, piezas, piezas testigo, escuadría y volumen).

<b>Secado Convencional</b>	<b>N° de piezas</b>	<b>Escuadría (mm)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Testigo</b>
<b>Ensayo 1</b>	99	25 x 100 x 1000	0.2475	4
<b>Ensayo 2</b>	48	50 x 100 x 1000	0.24	10
<b>Ensayo 3</b>	50	50 x 100 x 1000	0.25	4

**3.2.2b Secado bajo Vacío:**

Las piezas elegidas al azar para ingresar al interior del autoclave fueron 68, con una escuadría de 25 x 100 x 1500 mm., con un volumen de madera de 0.255 (m<sup>3</sup>), de las cuales se seleccionaron 4 muestras testigos.

Tanto a las muestras testigos como al resto de las piezas, se procedió a identificar el tipo de corte, medir el ancho y espesor a través de un pie de metro, con el fin de poder realizar un posterior cálculo de contracción (en el ancho, espesor y volumétrico) y además de realizar controles de contenido de humedad, masa, tensiones y gradientes (testigos).

Como apoyo, se utilizó un xilohigrómetro de resistencia eléctrica, que permitió controlar la humedad de la madera, particularmente útil, al final del secado.

**Cuadro N° 2.1: resumen preparación madera secado bajo vacío.**

(N° de ensayos, piezas, piezas testigo, escuadría y volumen).

<b>Secado Bajo Vacío</b>	<b>N° de piezas</b>	<b>Escuadría (mm)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Testigo</b>
<b>Ensayo 1</b>	68	25 x 100 x 1500	0.255	4

### 3.2.3. CONTROLES ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DEL PROCESO DE SECADO.

- **Determinación de la masa:** Se mide el peso de cada pieza, por medio de una balanza digital cuya precisión es igual a  $\pm 0.01$  g.
- **Marcación de puntos para la determinación de contracción:** En cada pieza se marcan tres puntos, para el espesor y ancho.
- **Determinación de la esquadria de las piezas:** Se midió cada pieza, en el ancho y espesor por medio de un pie de metro y largo a través de una huincha.
- **Identificación y observación de defectos:** Se llevo a cabo la identificación visual y medición de los defectos en una mesa de clasificación. (Acanaladura, torcedura, encorvadura y arqueadura).
- **Medición de temperatura y humedad del ambiente:** Para el caso del secado bajo vacío (ensayo 1) se obtienen la temperatura del interior y exterior de la madera y de la cámara, presión y el contenido de humedad de equilibrio cada 0.5 horas, Lo anterior fue posible gracias a la utilización de 7 termocuplas, con 3 pares de termocuplas colocadas en 3 piezas seleccionadas al azar, libre de defecto (nudos, médula, etc.) en zona de perforación, para evitar mediciones erróneas, aproximadamente a 1/2 del espesor y con una profundidad aproximada de 1.5 pulg. del ancho, para la temperatura al interior, y lo más cercana a la zona de interface (1/2 pulg.) (humedad de la madera-aire de secado) para la temperatura exterior y la última termocupla para medir la TBS.

Mientras que para el secado convencional (ensayo 1) se registra temperatura de bulbo seco, de bulbo húmedo y de la madera, medido por medio de termocuplas, un sistema de adquisición de datos y una computadora. Esto permitió obtener, cada 0.5 horas, el registro de las temperaturas del ambiente de secado, interior y exterior de la madera, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio. Lo anterior fue posible gracias a la utilización de 3 pares de termocuplas, 2 de las cuales fueron colocadas en 2 piezas



seleccionadas al azar, libre de defecto (nudos, médula, etc.) en zona de perforación, para evitar mediciones erróneas, aproximadamente a 1/2 del espesor y con una profundidad aproximada de 1/2 del ancho, para la temperatura al interior y lo más cercana a la zona de interface (humedad de la madera-aire de secado) para la temperatura exterior y el último par para medir TBS y TBH).

- **Contenido de humedad final:** Se determinó a las muestras testigos y luego de la obtención de la masa anhidra se evalúa la humedad de las muestras testigos. Se evalúan las muestras testigos considerando la norma chilena Nch 176/1 Of 84. Se determina la masa anhidra de las muestras testigos, mediante la siguiente fórmula:

$$M_o = \frac{M_f}{1 + CHf_{\text{xilohigrómetro}}} \times 100$$

Donde:

$M_o$  = Masa anhidra (g).

$M_f$  = Masa final (g).

$CHf$  = Contenido de humedad final promedio medido xilohigrómetro digital Wagner L612 (%)

Se obtiene así el contenido de humedad para cualquier instante (t) mediante la siguiente fórmula:

$$CH(t) = \frac{Mv(t) - M_o}{M_o} \times 100$$

Donde:

CH(t) = Contenido de humedad en cualquier instante (%)

M (t) = Masa verde (g), en cualquier instante.

M<sub>o</sub> = Masa anhidra (g).

- **Análisis de defectos:** Este análisis se efectúa considerando los siguientes defectos o alabeos (encorvadura, torcedura, arqueadura, acanaladura). Se miden los alabeos en cada pieza al comienzo y al final de cada ensayo, con el objeto de determinar por medio de sus diferencias el impacto que el secado tuvo en la generación de alabeos. Este efecto se evalúa mediante la norma chilena Nch 993 Of 72. La evaluación de las piezas en base a estos defectos, permitió establecer posteriormente la calidad del proceso de secado. Las características que determinan estos defectos como la forma en que fueron evaluados, se describe a continuación:

**Alabeos o deformaciones:** Toda distorsión que experimenta una pieza de madera que lleve a desviaciones en su plano original, respecto de sus ejes longitudinal y transversal, ó ambos. De acuerdo a lo anterior los alabeos considerados fueron:

- a) **Acanaladura:** Curva que se desarrolla en sentido transversal a las fibras.

- b) **Arqueadura:** Curva que presenta una pieza en el sentido longitudinal de las fibras, la oposición de sus caras llega a ser cóncava o convexa.
- c) **Encorvadura:** Alabeo de los cantos en dirección longitudinal.
- d) **Torcedura:** Alabeo helicoidal de la pieza en torno a su eje longitudinal.

### 3.3. CINÉTICA SECADO CONVENCIONAL

#### MATERIALES Y METODO

#### APARATOS EXPERIMENTALES

El estudio de la cinética para el Secado Convencional, para los tres ensayos realizados el primer, segundo semestre del 2002 y el primer semestre del 2003, se llevo a cabo en la cámara de secado convencional ubicada en el pabellón FONDEF de la Universidad del Bío-Bío, sede Concepción, cuya capacidad efectiva es de aproximadamente 0.3m<sup>3</sup>.

Las termocuplas que fueron conectadas a un sistema de adquisición de datos MAC-48 y de este a una computadora, cada 1/2 hora el registro de las temperaturas del ambiente de secado y de la madera.

#### EXPERIMENTOS:

Se utilizaron piezas de madera de pino radiata, verde sin cepillar, de 100 mm de ancho x 1000 mm de largo.

Los Programas de secado utilizados para los tres ensayos de secado convencional tienen en común la temperatura de trabajo (70 °C y 60°C para bulbo seco y húmedo respectivamente) y velocidad del aire (3 m/s) y los parámetros variables fueron el espesor de la madera (25 y 50 mm.).

## **METODOLOGIA**

### **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EXPERIMENTAL.**

Para la obtención del contenido de humedad experimental (Chexp) mediante el método gravimétrico, se eligieron muestras testigos lo más representativas posible del comportamiento global de la carga, lo cual se obtuvo a través de pesadas durante la evolución del secado en el tiempo (desde masa verde - hasta anhidra), con una balanza cuya precisión es de  $\pm 0.01\text{g}$  y fue registrada manualmente cada 8 horas de secado, cuyos valores son ajustados a una curva a través de algoritmos de regresión.

### **DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE MASA ( $K_x$ ).**

La determinación de coeficientes globales de transferencia de masa es realizada en base a la optimización de los datos de secado, mediante iteración con auxilio del módulo de optimización (Solver) del software Excel (Broche et al, 2002) y por la correlación 5.

### **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD TEORICO**

El contenido de humedad teórico correspondiente a cada valor experimental se expresa como:

$$CH_{k+1} = \frac{2-k}{2+k}CH_k + \frac{k}{2+k}(CHE_k + CHE_{k+1}) \quad (6)$$

### **DETERMINACION DEL CHE**

El CHE es determinado usando la correlación de Simpson (Siau, 1984), esto es:

$$CHE = \frac{1800}{K_3} \left( \frac{K_1 K_2 HR}{1 + K_1 K_2 HR} + \frac{K_2 HR}{1 - K_2 HR} \right) \quad (7)$$

Donde:

$$K_1 = 4.737 + 0.0477T - 0.0005T^2 \quad (8)$$

$$K_2 = 0.7095 + 0.0017T - 5.5534 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (9)$$

$$K_3 = 223.385 + 0.6942T + 0.0185T^2 \quad (10)$$

$$K_3 = 223.385 + 0.6942T + 0.0185T^2 \quad (11)$$

$$HR = \frac{P_v}{P_s} \quad (12)$$

$$P_v = P_{sth} - \frac{(P - P_{sth}) \cdot (T - TH)}{1546 - 1.44TH} \quad (13)$$

$$P_s = \exp \left[ \left( 51.29 - \frac{6651}{T} - 4.53 \cdot LN(T) \right) \right] \quad (14)$$

$$P_{sth} = \exp \left[ \left( 51.29 - \frac{6651}{TH} - 4.53 \cdot LN(TH) \right) \right] \quad (15)$$

### 3.4. ENSAYO EXPLORATORIO CINÉTICA SECADO BAJO VACÍO

#### MATERIALES Y METODO

#### APARATOS EXPERIMENTALES

El ensayo experimental se lleva a cabo en un autoclave piloto ubicado en el pabellón FONDEF de la Universidad del Bío-Bío, sede Concepción, cuya capacidad efectiva es de aproximadamente 0.3m<sup>3</sup>.

Las lecturas de temperatura fueron recogidas en un sistema de adquisición de datos MAC-48 y registradas automáticamente cada 30 minutos en una computadora.

## **EXPERIMENTOS:**

Se utilizaron piezas de madera verde de pino radiata, de 100 mm de ancho x 1500 mm de largo. El espesor fue de 25mm.

El programa de secado utilizado para el ensayo de secado vacío fue constante: temperatura 70 °C/9% (T/CHE), presión de vapor de 0.2 (bar).

## **METODOLOGÍA**

### **DETERMINACIÓN VELOCIDAD EXPERIMENTAL ( $\Phi_{exp}$ )**

La determinación de la velocidad experimental ( $\Phi_{exp}$ ) se obtiene a partir de una razón entre la variación el contenido de humedad experimental y de tiempo.

Para la obtención del contenido de humedad experimental ( $C_{exp}$ ) se empleó el método gravimétrico, se eligieron muestras testigos lo más representativas posible del comportamiento global de la carga, las cuales fueron pesadas durante la evolución del secado en el tiempo (cada 8 horas de secado), en una balanza de precisión. La variación experimental de la masa fue luego ajustada a una curva a través de algoritmos de regresión, utilizando el software Tablecurve 2D.

Por lo tanto la velocidad de secado quedara determinada mediante la siguiente ecuación:

$$\Phi_{exp} = \frac{\Delta CH}{\Delta t} \quad (16)$$

Donde:

$\Delta CH$  : variación de contenido de humedad (%).

$\Delta t$  : intervalo de tiempo (h).

## DETERMINACIÓN VELOCIDAD MAXIMA

La determinación de la velocidad máxima se obtiene a partir de la ecuación 3.

## CALCULO DE LA PRESION EN LA MADERA

En base a los datos de las lecturas de temperatura, según se indica anteriormente, se calcula la presión de vapor en la madera empleando la relación (Perré y Turner, 1997), esto es:

$$P_v = P_s \exp \left[ \left( -3.3527 - 0.01328 \cdot T + 23.63 \cdot 10^5 \cdot T^2 \right) \cdot \left( 0.8487 - 67.4 \cdot 10^{-5} \cdot T \right)^{0.2 \cdot CH} \right] \quad (17)$$

## CALCULO DEL CHE BAJO VACIO

El CHE se calcula de manera similar al secado bajo vacío tal como reportado por Chen y Lamb, 2002.

$$CHE = \frac{1800}{W} \left( \frac{K \cdot K_1 \cdot HR + 2 \cdot K^2 K_1 \cdot K_2 \cdot HR^2}{1 + K^2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot HR^2} + \frac{K \cdot HR}{1 - K \cdot HR} \right) \quad (18)$$

Donde:

$$W = 349 + 1.29T + 0.0135T^2 \quad (19)$$

$$K = 0.805 + 0.000736T - 2.73 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (20)$$

$$K_1 = 6.27 - 0.00938T - 0.000303T^2 \quad (21)$$

$$K_2 = 1.91 + 0.0407T - 0.000293T^2 \quad (22)$$

### 3.5 CALIDAD DEL PROGRAMA DE SECADO.

Con respecto a la determinación de la calidad del secado, esta se basa en la ponderación de los defectos, según cuadro N°3

**Cuadro N°3: Factores de ponderación para alabeos.**

Nivel	Descripción	Factor ponderación
A	Sin defecto	0.0
B	Leve	0.5
C	Moderado	2.0
D	Severo	2.5

Fuente: Kauman y Mittak, 1966

Se efectuaron mediciones de los defectos en cada pieza según Norma Chilena (Nch 993 Of. 72) y se procedió a clasificarlas según el siguiente cuadro:

**Cuadro N°4: tolerancia por nivel de defectos.**

(Límites permitidos en milímetros, para cada nivel según defecto).

Alabeos	Sin Defecto	Leve	Moderado	Severo
	A	B	C	D
Arqueadura	0.0	4.8	9.3	>14.2
Acanaladura	0.0	2.0	4.0	>6.0
Encorvadura	0.0	2.0	4.0	>4.0
Torcedura	0.0	3.5	6.8	>10.3

Para:

espesor = 25 mm.

ancho = 100 mm.

largo = 1000 mm.



**Cuadro N° 4.1: tolerancia por nivel de defectos.**

(Límites permitidos en milímetros, para cada nivel según defecto).

Alabeos	Sin Defecto <b>A</b>	Leve <b>B</b>	Moderado <b>C</b>	Severo <b>D</b>
Arqueadura	0.0	3.8	7.2	>7.2
Acanaladura	0.0	2.0	4.0	>4.0
Encorvadura	0.0	1.0	1.6	>1.6
Torcedura	0.0	3.2	6.1	>6.1

Para:

espesor = 50 mm.

ancho = 100 mm.

largo = 1000 mm.

**El índice de calidad** se determinó mediante la sumatoria de productos entre la cuantificación del número de piezas con determinado nivel de defectos y el factor de ponderación correspondiente, lo anterior dividido por el número total de piezas de la carga, según la siguiente expresión:

$$I = \frac{Na \times 0.0 + Nb \times 0.5 + Nc \times 2.0 + Nd \times 2.5}{M}$$

Donde:

I = Índice de Calidad.

Na = N° de piezas sin defectos.

Nb = N° de piezas con defecto en forma leve.

Nc = N° de piezas con defecto moderado.

Nd = N° de piezas con defecto intenso.

M = N° de piezas de la carga.

De acuerdo al índice de calidad obtenido, cada ensayo se clasificó, dentro de un nivel o escala, dependiendo este de la calidad residual obtenida luego del proceso de secado, a través de la siguiente tabla de Atributos de Calidad.

**Cuadro N° 5: Atributos de calidad.**

<b>Nivel de Secado</b>	<b>Indice</b>	<b>Condiciones de Secado</b>
Excelente	0.0	Adecuadas
Muy buena	0.1-0.5	
Buena	0.51-1.0	
Satisfactoria	1.1-1.5	Poco Adecuadas
Regular	1.51 - 2.0	
Defectuosa	2.1 - 3.0	Inadecuadas
Mala	3.1 - 5.0	
Muy mala	> 5.0	

Fuente: Kauman y Mittak, 1966.

- **Gradiente de humedad de la madera:**

La medición se realiza cortando una probeta de 10 mm. de espesor a 100 mm del extremo de la pieza, posteriormente se secciona la probeta en tres partes, con la pieza central más corta que la de los extremos (en forma de H) y a cada una de estas partes se les realiza mediciones de masa, con el objeto de determinar la diferencia de contenido de humedad entre las piezas laterales respecto de la central. La determinación del contenido de humedad se realizó por diferencia de masa, con precisión de 0.01g, todo esto al final del proceso de secado, realizando 2 mediciones:

1. En el instante en que se extrae la madera del secador, previa realización del programa (hora 0).

2. Finalmente a las 24 horas, hasta obtener masa constante en la estufa a una temperatura de  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**nota:** Con el fin de aleatorizar la medición y hacerla más confiable, se realiza esta en duplicado.

El gradiente de contenido de humedad se obtiene mediante la siguiente formula:

$$\text{GRAD. CH} = \text{CHi} - \frac{(\text{CHe1} + \text{CHe2})}{2}$$

Donde:

CHi = Contenido de Humedad medido para la pieza interior.

CHe = Contenido de Humedad medido para las piezas laterales.

El gradiente se clasificó en función de la humedad final, como se muestra en el siguiente cuadro:

**Cuadro N° 6: intensidad de gradiente permitido según calidad.**

(Límite permitido de gradiente de humedad en función de la humedad final).

Tipo de calidad	Gradiente (%)
(S) Estándar	CHF×0.4
(Q) Calidad	CHF×0.3
(E) Exclusiva	CHF×0.2

Fuente: Welling, 1994.

- **Determinación de las tensiones de secado:** La tensión se determina a través de una probeta la cual se divide en tres partes, de la cual se extrae la central y se mide la flecha resultante que generan las 2 piezas laterales, si estas quedan totalmente paralelas estas reflejan que la pieza esta libre de tensiones, todo esto al final del proceso de secado, realizando 3 mediciones:
  1. En el instante en que se extrae la madera del secador, previa realización del programa (hora 0).
  2. Luego de 12 horas mantenido las probetas bajo condiciones ambientales de presión y temperatura.
  3. Finalmente a las 24 horas, hasta obtener masa constante en la estufa a una temperatura de  $103 \pm 2$  °C.

**nota:** Con el fin de aleatorisar la medición y hacerla más confiable, se realiza esta en duplicado.

El nivel de tensión de cada pieza se clasificó en base a la flecha máxima, como se muestra en el siguiente cuadro:

**Cuadro N° 7: Clasificación de tensiones.**

Nivel de Tensión	Deformación
Tensión Baja	0.0 - 2.5
Tensión Media	2.5 - 4.0
Tensión Severa	> 4.0

Fuente: Infor, 1987.

**Cuadro N° 8: Grado admisible de tensiones internas para las diferentes clases de calidad de secado.**

Clase de calidad	Flecha máxima
Estándar	3 mm
Calidad	2 mm
Exclusiva	1 mm

Fuente: Welling, 1994.

- **Determinación de la contracción**

La contracción se determina a través de la determinación de la disminución de las dimensiones lineales de la madera en la dirección radial y tangencial, mediante la medición de la dimensión de probetas en estado verde y posteriormente terminado el secado en estado anhidro.

$$C_{(e,a)} = \frac{D_i - D_f}{D_i} \quad (23)$$

$D_i$  : dimensiones iniciales o antes del secado (mm).

$D_f$  : dimensiones finales o después del secado (mm).

**CAPITULO 4: ANALISIS Y RESULTADOS.**

**4.1. CINÉTICA SECADO CONVENCIONAL.**

En la tabla 1 se muestran los resultados del coeficiente global de transferencia de masa  $K_x$ . Se presenta el coeficiente global de transferencia de masa experimental  $K_{xexp}$ , el cual es obtenido a partir de la optimización de los datos recogidos experimentalmente. Además se muestra el coeficiente global de transferencia de masa correlacionado  $K_{xcorr}$ , obtenido a partir de la correlación con las variables del secado según la ecuación 5. En la tabla 1 se indican además, para cada uno de los ensayos, los parámetros variables y sus valores medios que permiten la obtención del coeficiente  $K_x$ .

**Tabla 1:** Parámetros variables y constantes en cada ensayo de secado

Coeficiente $k_x$ ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )		Ensayos Secado Convencional		
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
$k_{xexp} \cdot 10^{-5}$		6.90	5.81	6.77
$k_{xcorr} \cdot 10^{-5}$		8.88	5.83	4.78
Parámetro	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
E	(m)	0.0255	0.0505	0.0496
V	(m/s)	3.0	3.0	3.0
A	( $\text{m}^2$ )	26.73	15.31	14.88
Tbs	( $^{\circ}\text{C}$ )	70.12	71.44	65.78
HR	(1)	0.580	0.451	0.615
CHE	(1)	0.079	0.055	0.083
Tbh	( $^{\circ}\text{C}$ )	57.87	55.21	53.06
Mo	(kg)	112.69	103.68	118.34
Valores iniciales	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
HR	(%)	71.91	37.55	31.5
CHE	(%)	10.75	5.27	4.73
$\text{CH}_{k=0}$	(%)	78.15	126.01	141.19

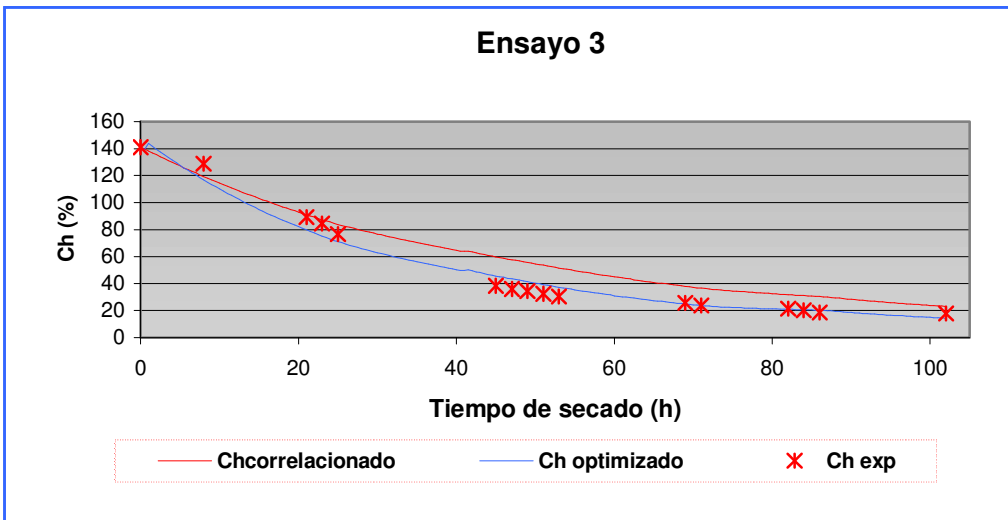
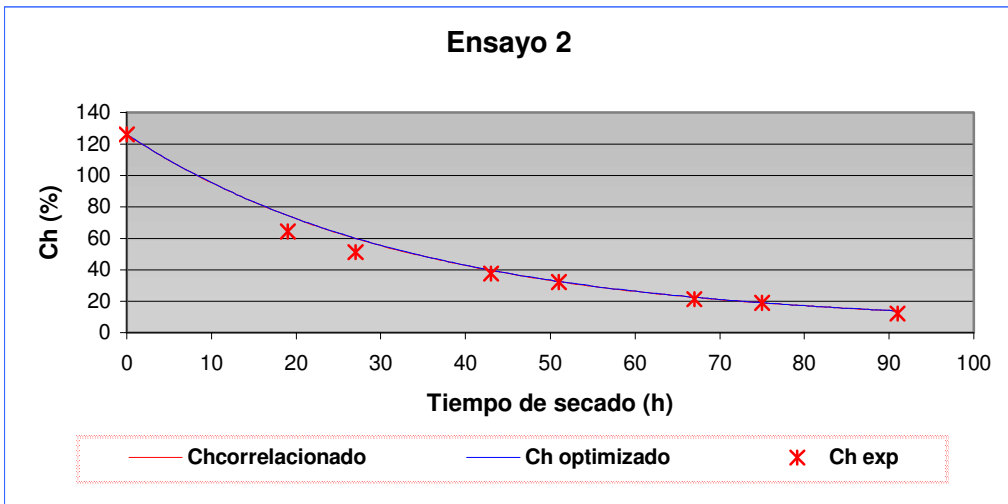
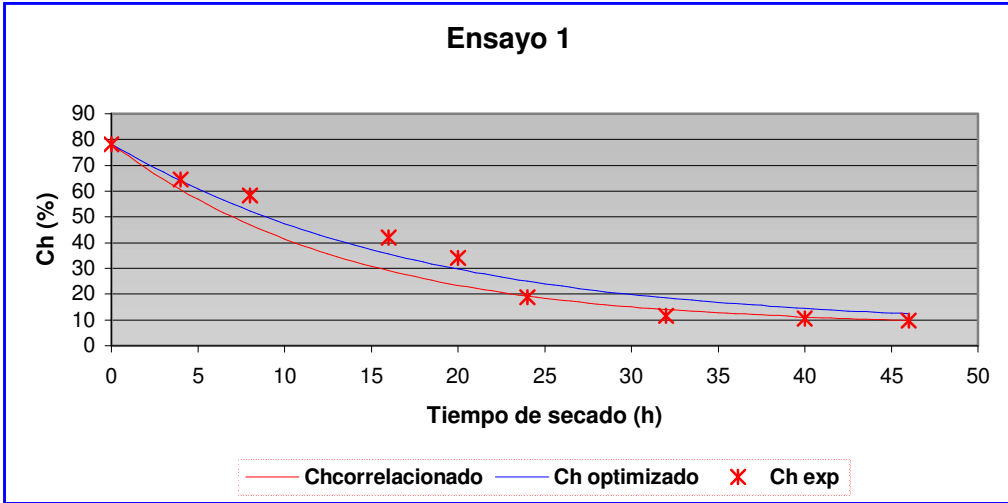
La magnitud de los valores obtenidos para el  $Kx$  determinado experimentalmente y optimizado se encuentra entre  $5.81 - 6.90 \cdot 10^{-5}$ , a partir de la correlación se encuentra entre  $4.78 - 8.88 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ).

Se observa una disminución de  $Kx$  con el espesor, esto es más notable al comparar el ensayo 1 con el ensayo 2, así como al comparar los valores determinados por la correlación. Esta disminución puede ser asociada a la mayor influencia del movimiento interno en la madera más gruesa, tal como reportado por Broche et. al 2002.

Otro aspecto interesante a destacar es que en promedio la magnitud del coeficiente global de secado para madera de pino radiata de los tres ensayos realizados es similar, el  $Kx$  recogido a través del proceso de optimización es de  $6.49 \cdot 10^{-5}$  y el  $Kx$  obtenido a partir de la correlación tiene un valor medio de  $6.50 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ). Esto quiere decir que el orden de grandeza del coeficiente de transferencia de materia del pino radiata secado bajo condiciones  $70/60$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ) y una velocidad del aire de  $3 \text{ m/s}$  es del orden de  $6.50 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ). Este orden de grandeza es similar al reportado para coníferas europeas por Ananías et al 2001.

**Tabla 2:** Variación del Contenido de Humedad en el tiempo ( $\text{Ch}_{\text{exp}}$ ,  $\text{Ch}_{\text{Kxcorr}}$  y  $\text{Ch}_{\text{teó}}$ ).

Tiempo	Ensayo 1			Ensayo 2			Ensayo 3		
	$\text{Ch}_{\text{exp}}$	$\text{Ch}_{\text{Kxcorr}}$	$\text{Ch}_{\text{teó}}$	$\text{Ch}_{\text{exp}}$	$\text{Ch}_{\text{Kxcorr}}$	$\text{Ch}_{\text{teó}}$	$\text{Ch}_{\text{exp}}$	$\text{Ch}_{\text{Kxcorr}}$	$\text{Ch}_{\text{teó}}$
0	78.15	78.15	78.15	126.01	126.01	126.01	141.19	141.19	141.19
12	45.90	36.72	43.03	72.88	90.29	90.39	108.40	109.78	103.76
24	26.36	19.27	25.02	54.79	64.97	65.11	79.47	85.60	73.09
36	15.13	12.49	16.34	42.66	47.45	47.60	58.27	69.26	54.98
<b>46</b>	9.53	9.79	12.37	34.96	36.73	36.88	44.99	58.78	44.51
48				33.61	34.98	35.12	42.72	56.77	42.54
60				26.52	26.29	26.42	31.32	44.95	31.01
72				20.84	20.17	20.28	22.96	35.91	23.14
84				16.22	15.83	15.92	16.84	31.05	20.54
<b>91</b>				13.92	13.85	13.92	14.05	27.79	18.08
96							12.34	25.45	16.21
<b>102</b>							10.57	22.94	14.31



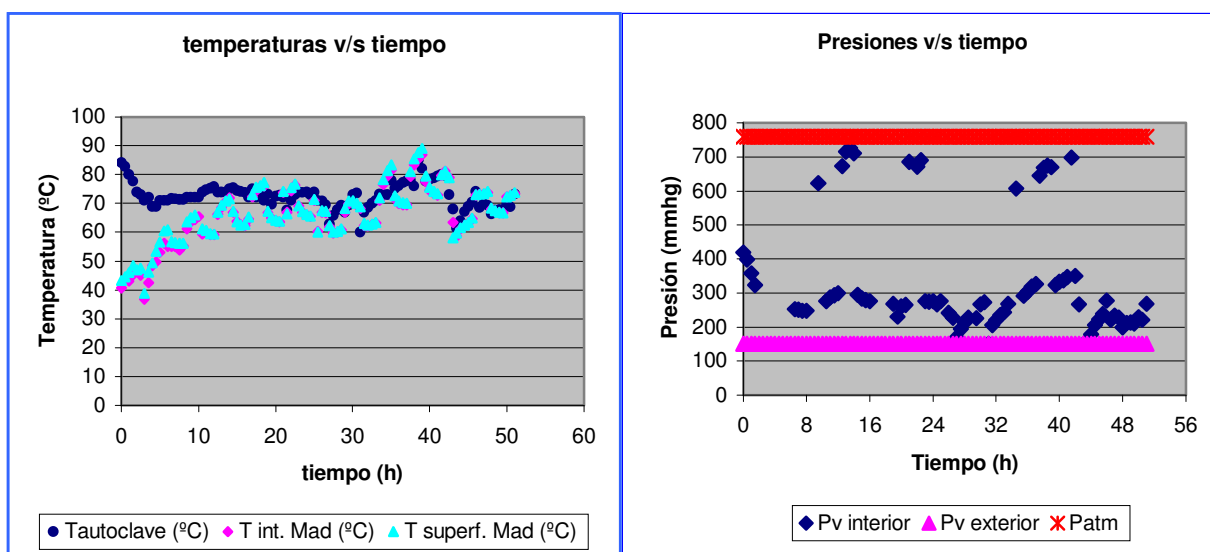
**Figura 3:** Curvas de secado para los tres ensayos realizados para secado convencional.



De acuerdo con la tabla 2 y figura 3, que presentan la variación del contenido de humedad sobre la base del coeficiente global teórico y correlacionado. Se puede observar de las tres curvas de secado obtenidas, que el contenido de humedad obtenido a través de optimización, predice de mejor forma el transiente de humedad, con un comportamiento muy similar al obtenido experimentalmente. No así para el caso del contenido de humedad obtenido a partir de la correlación donde los valores de error medio arrojados entre este y el contenido de humedad experimental son altos en comparación al caso anteriormente observado, con lo cual podemos señalar que la correlación presentada por Broche (2002) para coigüe, requiera probablemente algunas correcciones para mejorar la predicción de la evolución de humedad, durante el secado convencional de pino radiata.

#### 4.2. CINÉTICA SECADO BAJO VACÍO.

La evolución de la temperatura y presión al interior del autoclave bajo vacío se presentan en la Figura 4.

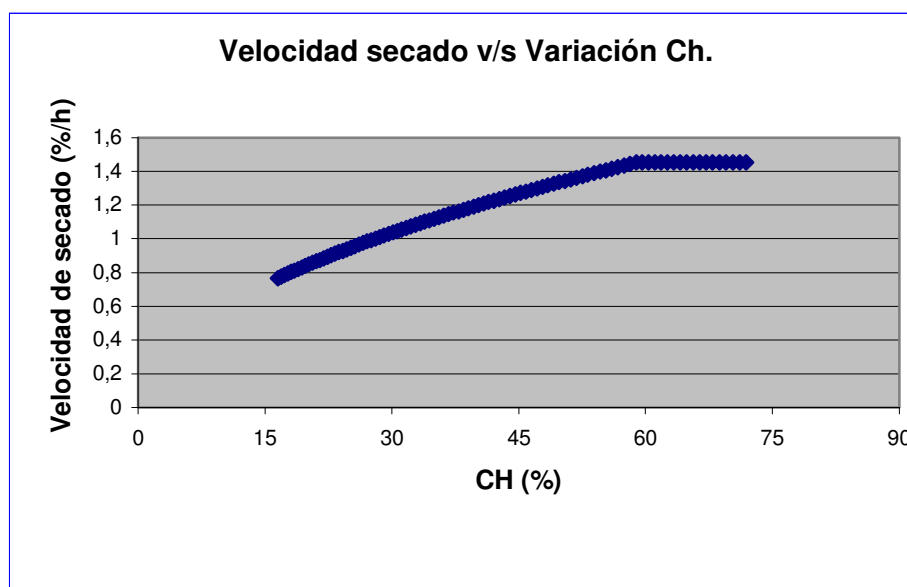


**Figura 4:** Comportamiento de la temperatura y la presión en el transcurso del secado.

Al inicio del secado se observa una notable diferencia en el comportamiento de la temperatura de la madera y del ambiente. Donde la temperatura al interior de autoclave y en la madera son de alrededor de 80°C y 40°C respectivamente. Esta diferencia de temperaturas, probablemente favorece la presencia de una primera etapa de secado constante lo cual provocara una rápida evaporación de humedad en la superficie de la madera.

La presión en el interior de madera es generalmente mayor que la presión en el autoclave, como consecuencia de la vaporización del agua en tales condiciones bajo vacío. Esta presión en exceso favorece el flujo interno del agua, lo cual es potenciado en las especies de mayor permeabilidad.

En el caso del interior de la madera la presión de vapor parte de un peak equivalente a la presión de saturación, la cual va decreciendo hasta un comportamiento relativamente constante a lo largo del secado y para todo instante es mayor que la presión de vapor del ambiente de secado. Los valores de presión parten de un peak de 418mmHg, para luego tender a un comportamiento relativamente constante con valor medio 250 mm Hg.



**Figura 5:** Comportamiento de la velocidad de secado en función del contenido de humedad.

La curva de secado bajo vacío se presenta en la Figura 5. De acuerdo a lo planteado anteriormente, esto es, la observación de una diferencia en las temperaturas, se presume la existencia de una primera etapa de secado constante al inicio del secado bajo vacío.

Esta primera etapa de secado, permanece alrededor de unas 10 a 12 h, luego comienza a elevarse la temperatura en la superficie de la madera, lo que implica la presencia de una cierta cantidad de calor que excede al requerido para evaporar el agua en la superficie, producto de una reducción en la cantidad de agua que migra desde el interior a la superficie de la madera.

Esta etapa se extiende desde el contenido de humedad inicial (75.18%) hasta el contenido de humedad crítico (58%), el cual determina el fin de esta etapa, con una velocidad de secado máxima de 1.45 (%/h).

La etapa de secado decreciente se muestra aquí ajustada a una curva polinomial de grado 2 mediante el software table curve 2D, tal como se indica en la metodología.

### **4.3. CALIDAD SECADO CONVENCIONAL.**

#### **4.3.1. Alabeos e índices de calidad:**

En el cuadro siguiente se puede apreciar los alabeos o defectos más significativos obtenidos al final del secado, para secado convencional

**Cuadro N°9: Índice de calidad, porcentaje de presencia en cada nivel según defecto al final del secado.**

<b>Secado Convencional - Ensayo1</b>						
<b>Alabeo</b>	<b>Sin defecto A</b>	<b>Leve B</b>	<b>Moderado C</b>	<b>Severo D</b>	<b>Indice Calidad</b>	<b>(%)</b>
Arqueadura	92.93%	6.06%	1.01%	0.00%	0.1	5.15
Acanaladura	100%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0	0.00
Encorvadura	86.87%	8.08%	1.01%	4.04%	0.2	16.49
Torcedura	50.51%	18.18%	21.01%	10.10%	0.8	78.35
<b>Indice de Calidad total de Secado:</b>					<b>1.00</b>	<b>100</b>

**Cuadro N°10: Índice de calidad, nivel y condición según defecto al final del secado.**

<b>Secado Convencional - Ensayo1</b>			
<b>Alabeo</b>	<b>Indice Calidad</b>	<b>Nivel de Secado</b>	<b>Condición de Secado</b>
Arqueadura	0.1	Muy Bueno	Adecuadas
Acanaladura	0.0	Excelente	Adecuadas
Encorvadura	0.2	Muy Bueno	Adecuadas
Torcedura	0.8	Bueno	Adecuadas
<b>Ensayo 1</b>	<b>1.00</b>	<b>Bueno</b>	<b>Adecuadas</b>

Al analizar el nivel de presencia de cada uno de los alabeos o deformación que sufre la madera durante el proceso de secado, para el ensayo 1, en arqueadura el porcentaje de piezas sin defecto es 92.93%, un 6.06% nivel defecto leve y de 1.01% moderado, 0% severo, lo cual los arroja un índice de calidad de 0.1, que corresponde a una calidad de

secado muy buena para este defecto. Para la acanaladura se tiene que el 100% de las piezas no posee este defecto, con un índice de calidad de 0.0, con calidad de secado excelente.

En el caso de la encorvadura se observa que el 86.87% de la piezas no presentan defecto, 8.08% nivel de defecto leve, 1.01% moderado y un 4.04% severo, con índice de calidad de 0.2 y calidad de secado para este defecto muy buena.

Los valores entregados para torcedura son los más gravitantes en el índice de calidad total de secado, dado que el índice de calidad obtenido para este defecto es mayor en comparación al de los otros alabeos ocupando un 78.35% del valor obtenido para el índice de calidad total de secado para este ensayo, con un valor de 0.8.

Del análisis de torcedura, se observa que del total de piezas del castillo (99 piezas) el 50.51% no presentan defecto, el 18.18% presentan nivel defecto leve, el 21.01% nivel moderado y el 10.10% nivel severo. Esto muestra un importante porcentaje para el nivel moderado e intenso lo cual implica un aumento inmediato en el índice de calidad, debido a que el nivel moderado y severo tiene el factor de ponderación más alto, lo cual se traduce en un aumento inmediato en la sumatoria de productos entre número de piezas con determinado nivel de defectos y el factor de ponderación correspondiente, con un consecuente desmedro en la calidad.

De todos los análisis anteriores y del índice de calidad resultante de cada uno de los alabeos, se llega a la conclusión que la calidad de la madera después del secado para el ensayo 1 es buena, con un índice de calidad de 1.0 y condiciones de secado adecuadas.

**Cuadro N° 11: Índice de calidad, porcentaje de presencia en cada nivel según defecto al final del secado.**

<b>Secado Convencional - Ensayo2</b>						
<b>Alabeo</b>	<b>Sin defecto A</b>	<b>Leve B</b>	<b>Moderado C</b>	<b>Severo D</b>	<b>Índice Calidad</b>	<b>(%)</b>
Arqueadura	14.58%	75.00%	10.42%	0.00%	0.6	27,72
Acanaladura	93.75%	2.08%	4.17%	0.00%	0.1	4,46
Encorvadura	56.25%	0.00%	8.33%	35.42%	1.1	50.00
Torcedura	58.33%	31.25%	8.33%	2.08%	0.4	17.82
<b>Índice de Calidad total de Secado:</b>					<b>2.1</b>	<b>100</b>

**Cuadro N° 12: Índice de calidad, nivel y condición según defecto al final del secado.**

<b>Secado Convencional - Ensayo2</b>			
<b>Alabeo</b>	<b>Índice Calidad</b>	<b>Nivel de Secado</b>	<b>Condición de Secado</b>
Arqueadura	0.6	Bueno	Adecuadas
Acanaladura	0.1	Muy Bueno	Adecuadas
Encorvadura	1.1	regular	Poco Adecuadas
Torcedura	0.4	Muy Bueno	Adecuadas
<b>Ensayo 1</b>	<b>2.1</b>	<b>Defectuoso</b>	<b>Inadecuadas</b>

Para el ensayo 2 se nota en arqueadura que el porcentaje de piezas sin defecto es 14.58%, un 75.00% presenta defecto leve, de 10.42% nivel de defecto moderado y un 0% nivel severo, lo cual los arroja un índice de calidad de 0.6, que corresponde a una calidad de secado buena para este defecto. Para la acanaladura el porcentaje de piezas sin defecto es 93.75%, un 2.08% nivel defecto leve, de 4.17% en nivel moderado y 0.00% en o nivel

severo, lo cual arroja un índice de calidad de 0.1, que corresponde según este valor a una calidad de secado muy buena para este defecto.

En el caso de la encorvadura se tiene que el 56.25% de las piezas no presentan defecto, 0.00% nivel de defecto leve, 8.33% moderado y un 35.42% nivel severo, con índice de 1.1 y calidad de secado regular para este defecto. Para la torcedura se tiene que el 58.33% de las piezas no presentan defectos, el 31.25% esta dentro del nivel de defecto leve, el 8.33% nivel de defecto moderado y un 2.08% de las piezas dentro del nivel denominado como severo, o sea, un índice de calidad de 0.4, lo que corresponde a una calidad de secado muy buena para este defecto.

Los valores entregados para encorvadura son los más gravitantes en el índice de calidad total de secado, dado que el índice de calidad obtenido para este defecto es mayor en comparación al de los otros alabeos ocupando un 50% del valor obtenido para el índice de calidad total de secado para este ensayo, con un valor de 1.1. Se observa que del total de piezas del castillo (48 piezas), un 35.42% de ellas se encuentran dentro del nivel correspondiente a una deformación severa, lo cual es un porcentaje alto y que determina de gran manera el alto índice obtenido para este defecto (1.1 / 50% del índice total) debido a la alta ponderación dada para este nivel y su importante contribución en la sumatoria de los índices de cada alabeo, el cual es de un 2.1.

De todos los análisis anteriores y de la sumatoria de los índices de calidad resultante de cada uno de los alabeos, se llega a la conclusión que la calidad de secado para el ensayo 2 es defectuosa, para índice de calidad de 2.1 y condiciones de secado poco adecuadas.

**Cuadro N° 13: Índice de calidad, porcentaje de presencia en cada nivel según defecto al final del secado.**

<b>Secado Convencional - Ensayo3</b>						
<b>Alabeo</b>	<b>Sin defecto A</b>	<b>Leve B</b>	<b>Moderado C</b>	<b>Severo D</b>	<b>Índice Calidad</b>	<b>(%)</b>
Arqueadura	60%	38%	2.00%	0.00%	0.2	11.62
Acanaladura	90.00%	6.00%	4.00%	0.00%	0.1	5.56
Encorvadura	30.00%	22.00%	28.00%	20.00%	1.2	59.09
Torcedura	48.00%	38.00%	14.00%	0.00%	0.5	23.74
Índice de Calidad total de Secado:					<b>2.0</b>	100

**Cuadro N° 14: Índice de calidad, nivel y condición según defecto al final del secado.**

<b>Secado Convencional - Ensayo3</b>			
<b>Alabeo</b>	<b>Índice Calidad</b>	<b>Nivel de Secado</b>	<b>Condición de Secado</b>
Arqueadura	0.2	Muy Bueno	Adecuadas
Acanaladura	0.1	Muy Bueno	Adecuadas
Encorvadura	1.2	regular	Poco Adecuadas
Torcedura	0.5	Muy Bueno	Adecuadas
<b>Ensayo 1</b>	<b>2.0</b>	<b>Menos de regular</b>	<b>Poco Adecuadas</b>

Para el ensayo 3 se nota en arqueadura que el porcentaje de piezas sin defecto es 60%, un 38% presenta defecto leve, de 2% nivel de defecto moderado y un 0% nivel severo, lo cual los arroja un índice de calidad de 0.2, que corresponde a una calidad de secado muy buena para este defecto. Para la acanaladura el porcentaje de piezas sin defecto es 90%, un 6% nivel defecto leve, de 4% en nivel moderado y 0% en o nivel severo, lo cual arroja un



índice de calidad de 0.1, que corresponde según este valor a una calidad de secado muy buena para este defecto.

En el caso de la encorvadura se tiene que el 30% de la piezas no presentan defecto, 22% nivel de defecto leve, 28% moderado y un 20% nivel severo, con índice de 1.2 y calidad de secado regular para este defecto.

Para la torcedura se tiene que el 48% de las piezas no presentan defectos, el 38% esta dentro del nivel de defecto leve, el 14% nivel de defecto moderado y un 0% de las piezas dentro del nivel denominado como severo, o sea, un índice de calidad de 0.5, lo que corresponde a una calidad de secado muy buena para este defecto.

Los valores entregados para encorvadura son los más gravitantes en el índice de calidad total de secado, dado que el índice de calidad obtenido para este defecto es mayor en comparación al de los otros alabeos ocupando un 59.09% del valor obtenido para el índice de calidad total de secado para este ensayo, con un valor de 1.2.

Del análisis de encorvadura, Se observa que del total de piezas del castillo (50 piezas), el 28% presenta un nivel de defecto moderado y un 20% corresponde a una deformación severa, lo cual es un porcentaje alto y que determina de gran manera el alto índice obtenido para este defecto (1.2 / 59.09% del índice total) debido a la alta ponderación dada para estos niveles y su importante contribución en la sumatoria de los índices de cada alabeo, el cual es de un 2.0.

De todos los análisis anteriores y de la sumatoria de los índice de calidad resultante de cada uno de los alabeos, se llega a la conclusión que la calidad de secado para el ensayo 3 es Menos de regular, para índice de calidad de 2.1 y condiciones de secado poco adecuadas.

#### 4.3.2. Gradiente de humedad.

Los resultados de gradientes de humedad obtenidos en los ensayos para secado convencional, son presentados en el siguiente cuadro:

**Cuadro N° 15: Gradiente de humedad al final del secado.**

<b>Secado Convencional - Ensayo1</b>	
<b>Testigo</b>	<b>Gradiente (%)</b>
15	1.19
17	0.87
65	1.10
69	1.51

<b>Secado Convencional - Ensayo3</b>	
<b>Testigo</b>	<b>Gradiente (%)</b>
<b>10</b>	3,58
<b>19</b>	4,33
32	6.67
<b>35</b>	3.26
38	4.41
<b>40</b>	1.91

Los resultados de gradiente de humedad muestran que para ensayo 1 fluctúa entre 0.87% y 1.51%, con un gradiente promedio de 1.17% y una variabilidad de este de 0.26%. Para el segundo ensayo no se registra medición, no así para el ensayo 3, donde el gradiente de humedad fluctúa entre 1,91% y 6.67%, con un gradiente promedio de 4.04% y una variabilidad de 1.61%. La mayor heterogeneidad y magnitud del gradiente de humedad, se

asocia al mayor espesor (el doble en relación ensayo 1), con lo cual se espera una mayor diferencia de contenido de humedad entre el interior y la superficie de la pieza, atribuible a una mayor distancia que debe recorrer el agua presente al centro de la pieza y la menor energía presente en esta, versus superficie ya seca, debido a la acción directa de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire.

Según los gradientes de humedad final obtenidos, podemos indicar la clase de calidad resultante para los dos ensayos anteriores, lo cual se muestra en el siguiente cuadro:

**Cuadro N° 16: Calidad del secado en función del gradiente de humedad.**

<b>Secado Convencional - Ensayo1</b> <b>Ch final: 9.82 (%)</b>	
<b>Testigo</b>	<b>Calidad</b>
15	E
17	E
65	E
69	E
<b>Secado Convencional - Ensayo3</b> <b>Ch final: 17.64 (%)</b>	
<b>Testigo</b>	<b>Calidad</b>
<b>10</b>	Q
<b>19</b>	Q
32	S
<b>35</b>	E
38	Q
<b>40</b>	E

De los resultados entregados en el cuadro anterior se tiene para el ensayo 1, la calidad del secado resultante exclusiva (E) con un gradiente menor o igual a 1.96 (%).

Para el ensayo 3, tenemos que el 16.67% de la carga tiene una calidad (S) estándar, 50% a (Q) secado de calidad y el 33.33% corresponde a calidad (E) exclusiva, de lo cual se concluye que el ensayo 3 corresponde a un secado de calidad (Q).

#### 4.3.3. Tensiones de secado.

Los resultados de tensiones de secado se presentan en el siguiente cuadro:

**Cuadro N° 17: Tensiones al final del secado.**

<b>Secado Convencional - Ensayo1</b>			
<b>Grado</b>	<b>0 (h)</b>	<b>12 (h)</b>	<b>24 (h)</b>
Baja	100%	100%	100%
Media	0.00%	0.00%	0.00%
Severa	0.00%	0.00%	0.00%

De los valores de tensión obtenidos para el ensayo 1, da como resultado un grado o nivel de tensión bajo para el 100% de las probetas ensayadas, para el periodo de tiempo 0, 12 y 24 h. respectivamente.

**Cuadro N° 18: Calidad de secado en función de tensiones de secado.**

<b>Secado Convencional - Ensayo1</b>			
<b>Calidad</b>	<b>0 (h)</b>	<b>12 (h)</b>	<b>24 (h)</b>
(S) Estándar	0.00%	0.00%	0.00%
(Q) Calidad	0.00%	0.00%	100%
(E) Exclusiva	100%	100%	0.00%

Del cuadro N° 18 de calidad del secado para el ensayo 1, la calidad del secado es (E) exclusiva para el intervalo 0 - 12h. , mientras que para el instante 24h se produjo un descenso en el nivel de calidad, clasificando en la clase (Q) calidad de secado.

De lo anterior se resuelve que el nivel de tensión al final del proceso de secado para el ensayo 1 es bajo, y la calidad de secado resultante califica en (Q) calidad.

**Cuadro N° 19: Tensiones al final del secado.**

<b>Secado Convencional - Ensayo 3</b>			
<b>Grado</b>	<b>(%)</b>	<b>Calidad</b>	<b>(%)</b>
Baja	83.33	(S) Estándar	16.67
Media	16.67	(Q) Calidad	16.67
Severa	0.00	(E) Exclusiva	66.67

De los valores de tensión obtenidos para el ensayo 3, da como resultado un grado o nivel de tensión bajo para un 83.33% de las probetas ensayadas y un nivel de tensión medio para un 16.67% de las probetas.

Analizando la calidad del secado en función del ítem tensiones al final del proceso de secado se obtienen los siguientes resultados:

Del cuadro N° 19 al observar los resultados de calidad de secado para el ensayo 3, la calidad del secado es (E) exclusiva en un porcentaje de un 66.67%, mientras que para el nivel de calidad (S) estándar y (Q) calidad tienen igual porcentaje (16.67%) de piezas dentro de esta clasificación.

De lo anterior se concluye que el nivel de tensión al final del proceso de secado para el ensayo 3 es bajo, y la calidad de secado resultante califica en (E) exclusiva.

#### 4.4. ANALISIS Y RESULTADOS CALIDAD SECADO BAJO VACÍO.

##### 4.4.1. Alabeos e índices de calidad:

En el cuadro siguiente se puede apreciar los alabeos o defectos más significativos obtenidos al final del secado, para secado vacío

**Cuadro N° 20: Índice de calidad, porcentaje de presencia en cada nivel según defecto al final del secado:**

Secado Convencional - Ensayo1						
Alabeo	Sin defecto A	Leve B	Moderado C	Severo D	Indice Calidad	(%)
Arqueadura	69.12%	30.88%	0.00%	0.00%	0.2	12.21
Acanaladura	61.76%	30.88%	7.35%	0.00%	0.3	23.84
Encorvadura	36.76%	57.35%	5.88%	0.00%	0.4	31.89
Torcedura	50.51%	18.18%	21.01%	10.10%	0.4	31.89
Indice de Calidad total de Secado:					<b>1.3</b>	100

**Cuadro N° 21: Índice de calidad, nivel y condición según defecto al final del secado.**

Secado Convencional - Ensayo1			
Alabeo	Indice Calidad	Nivel de Secado	Condición de Secado
Arqueadura	0.2	Muy Bueno	Adecuadas
Acanaladura	0.3	Muy Bueno	Adecuadas
Encorvadura	0.4	Muy Bueno	Adecuadas
Torcedura	0.4	Muy Bueno	Adecuadas
<b>Ensayo 1</b>	<b>1.3</b>	<b>Satisfactorio</b>	<b>Poco adecuadas</b>

Al analizar el nivel de presencia de cada uno de los alabeos o deformación que sufre la madera durante el proceso de secado bajo vacío, para el ensayo 1, en arqueadura el porcentaje de piezas sin defecto es 69.12%, un 30.88% nivel defecto leve y de 0.00% para moderado y severo, lo cual los arroja un índice de calidad de 0.2, que corresponde a una calidad de secado muy buena para este defecto. Para la acanaladura se tiene que el 61.76% de las piezas no posee este defecto, 30.88% nivel defecto leve, 7.35% moderado y un 0.00% severo, con índice de calidad de 0.3 y calidad de secado para este defecto muy buena.

En el caso de la encorvadura se observa que el 36.76% de la piezas no presentan defecto, 57.35% nivel de defecto leve, 5.88% moderado y un 0.00% severo, con índice de calidad de 0.4 y calidad de secado para este defecto muy buena. Para la torcedura se tiene que el 50.51% de las piezas no posee defecto, 18.18% nivel de defecto leve, 21.01% moderado y un 10.10% severo, con índice de calidad de 0.4 y calidad de secado para este defecto muy buena.

De todos los análisis anteriores y del índice de calidad resultante de cada uno de los alabeos, se llega a la conclusión que la calidad de la madera después del secado para el ensayo 1 es satisfactoria, con un índice de calidad de 1.3 y condiciones de secado poco adecuadas.

#### **4.4.2. Gradiente de humedad.**

Los resultados de gradientes de humedad obtenidos para secado bajo vacío, son presentados en el siguiente cuadro:

**Cuadro N°22: Gradiente de humedad al final del secado.**

<b>Secado Vacío - Ensayo1</b>	
<b>Testigo</b>	<b>Gradiente (%)</b>
20	1.11
36	0.64
67	0.53
68	0.61

Los resultados de gradiente de humedad muestran que para ensayo 1 fluctúa entre 0.53% y 1.11%, con un gradiente promedio de 0.72% y una variabilidad de este de 0.26%.

Según los gradientes de humedad final obtenidos, podemos indicar la clase de calidad resultante para el ensayo anterior, lo cual se muestra en el siguiente cuadro:

**Cuadro N°23: Calidad del secado en función del gradiente de humedad.**

<b>Secado Vacío - Ensayo1</b>	
<b>Ch final: 6.91 (%)</b>	
<b>Testigo</b>	<b>Calidad</b>
20	E
36	E
67	E
68	E

De los resultados entregados en el cuadro anterior se tiene para el ensayo 1, la calidad del secado resultante exclusiva (E) con un gradiente menor o igual a 1.38 (%).



#### 4.4.3. Tensiones de secado.

Los resultados de tensiones de secado se presentan en el siguiente cuadro:

**Cuadro N° 24: Tensiones al final del secado.**

<b>Secado Vacío - Ensayo1</b>			
<b>Grado</b>	<b>0 (h)</b>	<b>12 (h)</b>	<b>24 (h)</b>
Baja	100%	100%	100%
Media	0.00%	0.00%	0.00%
Severa	0.00%	0.00%	0.00%

De los valores de tensión obtenidos para el ensayo 1, da como resultado un grado o nivel de tensión bajo para el 100% de las probetas ensayadas, para el periodo de tiempo 0, 12 y 24 h. respectivamente.

Analizando la calidad del secado en función del ítem tensiones al final del proceso de secado se obtienen los siguientes resultados

**Cuadro N° 25: Calidad de secado en función de tensiones de secado.**

<b>Secado Vacío - Ensayo1</b>			
<b>Calidad</b>	<b>0 (h)</b>	<b>12 (h)</b>	<b>24 (h)</b>
(S) Estándar	0.00%	0.00%	25%
(Q) Calidad	0.00%	25%	25%
(E) Exclusiva	100%	75%	50%

Del cuadro N° 25 la calidad del secado para el ensayo 1, la calidad del secado es (E) exclusiva para el instante de 0h, mientras que en el instante 12h se produjo un descenso en el nivel de calidad, con un 75% de las piezas clasificando en calidad exclusiva (E) y el 25% restante correspondiente a secado de calidad (Q). ya para el instante final de evaluación se

tiene un descenso aun mayor en la calidad, con un 50% de las piezas en el nivel de calidad exclusiva (E), un 25% califica en el nivel secado de calidad (Q) y el 25% restante en el nivel de calidad estándar (S).

De lo anterior se resuelve que la calidad obtenida al final del proceso de secado vacío, en función del ítem tensiones al final del proceso corresponde a un secado de calidad exclusiva (E).

#### 4.5. VARIACION DIMENSIONAL

##### 4.5.1. Contracción.

En el siguiente cuadro se indican los valores promedios de contracción obtenidos para el secado convencional y bajo vacío.

**Cuadro N° 26: Valores promedios contracción.**

<b>Secado Convencional</b>	<b>CA (%)</b>	<b>CE (%)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>Ensayo 1</b>	3.91	1.91	5.81
<b>Ensayo 2</b>	2.62	2.23	4.84
<b>Ensayo 3</b>	2.59	2.30	4.88
<b>Promedio</b>	3.04	2.14	5.18
<b>Desv. Estándar</b>	0.75	0.21	
<b>Secado Bajo Vacío</b>	<b>CA (%)</b>	<b>CE (%)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>Ensayo 1</b>	3.18	3.17	6.35

Se observa que los valores de contracción promedio son muy similares tanto para el ancho y espesor de las piezas, con una variación de 0.75 y 0.21(mm) respectivamente, por lo cual en virtud de este análisis, como resultado de contracción para secado convencional, podemos indicar que tanto para ancho como para espesor de las piezas de pino radiata esta es de 3.04 y 2.14 (mm).

La disminución de las dimensiones unitarias y contenido de humedad a medida que avanza el tiempo, observadas en el cuadro N° 27 refuerzan la baja contracción en el pino radiata.

**Cuadro N° 27: Variación del contenido de humedad y dimensiones unitarias durante la evolución del secado.**

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Ch (%)</b>	<b>ΔA (mm)</b>	<b>ΔE (mm)</b>
0	78.15	0.00	0.00
4	64.78	0.87	0.18
8	58.39	1.07	0.18
16	41.99	1.34	0.30
20	34.10	1.79	0.38
24	18.74	2.23	0.39
32	11.49	3.59	0.42
40	10.55	3.85	0.44
46	9.80	4.06	0.50

Δ: Variación dimensional.

Sobre el 30% de humedad, la variación en dimensiones unitarias no es muy significativa tanto en el ancho que no alcanza a los 2mm (1.79mm), como en el espesor con despreciables 0.38mm. Bajo el PSF se aprecia una disminución importante dentro de las dimensiones, en especial en el ancho, llegando este al final del secado a registrar una reducción de 4.06 (mm), desde el inicio del secado (t=0) y de 0.5 (mm) para el espesor.

La diferencia o desuniformidad en los valores de reducción de las dimensiones sufridas por las piezas durante el secado se debe principalmente, al carácter anisotrópico de la madera, es decir, los cambios dimensionales no ocurren de la misma forma en todas las direcciones de la madera, siendo por tanto, la contracción diferente en el sentido longitudinal, radial y tangencial, con una contracción en sentido longitudinal que varía entre 0,1 - 0,3, en sentido radial para coníferas de 2,2 - 5 %, mientras en el sentido tangencial se verifican las mayores

variaciones dimensionales en razón de la pérdida de humedad con valores que fluctúan entre 4,0 - 9 % para coníferas.

A lo anterior se debe agregar que la contracción en el espesor es menor que la producida en el ancho, debido esto a la oposición que presentan los radios a contraerse (soporte mecánico) en este sentido, lo cual se observa claramente en los resultados obtenidos.

A partir de los análisis realizados para los tres ensayos, se observa que la madera de pino radiata, secado bajo un programa convencional 70/60 °C/°C, desde verde hasta 13 % de humedad no presenta altos valores de contracción. En el caso del secado bajo vacío se observa un valor de contracción mayor tanto en el ancho como en el espesor, por ende una mayor contracción volumétrica, lo cual se explica principalmente por el menor contenido de humedad final alcanzado en este ensayo de 6.91(%).

## **CAPITULO 5: CONCLUSIONES.**

- La humedad de la madera durante el secado convencional de pino radiata es satisfactoriamente descrita por el coeficiente global de secado. El coeficiente global de secado, bajo condiciones prefijadas 70/60 (°C/°C) y una velocidad del aire de 3 m/s es del orden de  $6.5 \cdot 10^{-5}$  (kg/m<sup>2</sup>·s).
- De la exploración realizada para secado bajo vacío en vapor sobrecalentado, para madera de pino radiata de 25 mm de espesor, se acusa la presencia de una primera etapa de secado constante, de una duración de 10 a 12h, con una velocidad de secado máxima de 1.45 (%/h), con un contenido de humedad crítico de 58%.
- Para madera de pino radiata de 25 mm de espesor, sometidas a secado convencional y bajo vacío a escala piloto, la calidad de la madera resulta ser buena y satisfactoria respectivamente.

## **CAPITULO 6: RECOMENDACIONES.**

- Realizar mediciones experimentales de la presión en el interior de la madera durante el secado bajo vacío
- Extender el estudio de la cinética del secado bajo otras condiciones de secado y a otras especies.

## CAPITULO 7: BIBLIOGRAFIA.

- **Alvarez, H.; Fernández, J. 1992.** Fundamentos teóricos del secado de la madera, Monografías INIA N° 82, Madrid, España.
- **Ananías, R.A.; Chrusciel, L.; Mougel, E.; Zoulalian, A. 2001a.** Drying rate modelling of convective wood drying at low temperature. Unpublished data.
- **Ananías R.; Broche W.; Salinas C. 2001b.** Modelación del secado convencional de coigüe. Parte 1: Fundamentación teórica. Maderas, Ciencia y Tecnología 3 (1y2): pág.27-34.
- **Broche, C. W. 2002.** Modelación del secado convencional del coigüe basada en el coeficiente global de transferencia de materia. Tesis de Magister en Ciencia y Tecnología de la Madera, Universidad del Bío-Bío.
- **Broche, W.; Ananías, R.A.; Salinas, C.; Ruiz, P. 2002.** Modelación del secado convencional del coigüe. Parte 2. Resultados experimentales. Maderas: Ciencia y Tecnología 4(2):69-76.
- **Chen, Z.; Lamb, F. 2002.** Theoretical equilibrium moisture content of wood under vacuum. Wood Fiber Science 34(4):553-559.
- **INFOR 1987.** "Secado por deshumidificación". Informe técnico N° 100, INFOR, Chile.
- **INFOR 2003.** Boletín de Estadísticas Forestales.
- **Kauman, W,G.; Mittak, G. 1966.** Ensayos de secado de coigüe. Informe Técnico N° 25, INFOR, Chile.
- **Lignum 2002.**"Secado de madera de pino radiata". pág. 19-22
- **Neumann, R.; Mielke, A.; Bönher, G. 1992.** Comparison of conventional and convective vacuum drying of beech. 3<sup>rd</sup> IWDC: 222-226.
- **Norma chilena Nch. 176/1 Of 84.** Determinación de humedad.
- **Norma chilena Nch. 176/3 Of 84.** Determinación de la contracción radial y tangencial.
- **Norma chilena Nch. 992 Of 72.** Defectos a considerar en la clasificación terminología y métodos de medición.
- **Norma chilena Nch. 993 Of 74.** Procedimiento y criterios de evaluación para la clasificación.

- **Perré, P.; Joyet, P.; Aléon, D. 1995.** Vacuum drying: Physical requirements and practical solutions. Vacuum drying of wood 95': 7-34.
- **Perré, P.; Turner, I. 1997.** The use of macroscopic equations to simulate heat and mass transfer in porous media: some possibilities illustrated by a wide range of configurations that emphasise the role of internal pressure. In Mathematical modeling and numerical techniques in drying technology. Ed.: Turner, I & Mujumdar, A.: 83-156. Dekker, USA.
- **Siau, J. 1984.** "Transport processes in wood". Springer-verlag. Berlín.
- **Welling, J. 1994.** Drying quality assessment and specification a challenge for the future. 8th. IWDC: 297-304.

## **ANEXO N°1: DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.**

Planta de secado convencional y un autoclave piloto localizados en el pabellón FONDEF de la Universidad del Bío-Bío, sede Concepción.

### **a) Cámara de secado convencional a escala de laboratorio: Las características son las siguientes:**

Capacidad	0,2 m <sup>3</sup>
Largo máximo de la madera	1 m,
Potencia de ventiladores	0,75 HP.
N° de ventiladores	2
Sistema de calefacción	Eléctrico
Sistema de humidificación	Vapor
Control de temperatura	Sistema semiautomático
Temperatura máxima de trabajo	99 °C
Control de humedad	Sensores de Humedad

### **b) Cámara de secado por vacío: A escala de laboratorio.**

Capacidad	0,3 m <sup>3</sup>
Largo máximo de la madera	2,2 m.
Potencia de ventiladores	1,5 HP.
N° de ventiladores	6
Sistema de giro	Automático
Sistema de calefacción	Vapor
Sistema de humidificación	Vapor
Control de temperatura	Sistema semiautomático
Temperatura máxima de trabajo	95 % vacío
Control de humedad	Sensores de humedad