

ESTUDIO DE LA CINÉTICA DEL SECADO CONVENCIONAL Y BAJO VACÍO DEL PINO RADIATA♣

Drying kinetics of conventional and vacuum drying in radiata pine

Rubén A. ANANIAS¹, Sergio VALLEJOS², Carlos SALINAS³

In memoriam of Dr. H. Peter STEINHAGEN

RESUMEN

Se estudia la cinética del secado convencional y bajo vacío de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don). Se analiza la evolución de la humedad de la madera durante el secado convencional basándose en el cálculo de un coeficiente global de secado. Bajo vacío se explora la velocidad del secado apoyándose en la determinación de una curva característica.

La madera utilizada en los experimentos es recogida al azar y recién aserrada en una planta industrial de la Octava Región, Chile. Se realizan tres ensayos de secado convencional utilizando un programa con condiciones ambientales constantes 70/60 (°C/°C) y un ensayo de secado bajo vacío con temperatura ambiente de 70 (°C), humedad de equilibrio de la madera igual a 9 (%) y un nivel de vacío de 20 %. Mediciones experimentales de la evolución de la masa y la temperatura del aire y de la madera son recogidas durante el transcurso de todos los ensayos de secado.

Los resultados muestran que durante el secado convencional de pino radiata, la evolución de la humedad de la madera puede ser representada satisfactoriamente con un coeficiente global de secado de $6.5 \cdot 10^{-5}$ (kg/m².s). Durante el secado bajo vacío del pino radiata, la curva característica presenta una etapa inicial de secado constante de 11 horas, un contenido de humedad crítico de 58 (%) y una velocidad de secado máxima de 1.45 (%/h).

Palabras Claves: secado convencional, secado bajo vacío, cinética del secado, velocidad de secado, pino radiata

♣ Paper inicialmente presentado en II Congreso Chileno de Ciencias Forestales 2004, Universidad Austral, Valdivia, Chile y preseleccionado para la revista MADERAS:Ciencia y Tecnología. Recibido: 30.12.2004. Aceptado:04.04.2005. Maderas:Ciencia y Tecnología 7(1): 37-47.

¹ Profesor Asociado. Universidad del Bío-Bío. Fac. Ingeniería. Depto. Ingeniería en Maderas. ✉: ananias@ubiobio.cl

² Ingeniero en Maderas. Universidad del Bío-Bío. Fac. Ingeniería. Depto. Ingeniería en Maderas. svallejo@ubiobio.cl

³ Profesor Asistente. Universidad del Bío-Bío. Fac. Ingeniería. Depto. Ingeniería Mecánica. casali@ubiobio.cl

ABSTRACT

The drying kinetic during conventional temperature drying and vacuum drying of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) was studied. The evolution of the wood moisture content based on the calculation of a global drying coefficient was analyzed. In vacuum drying the drying rate was explored and a characteristic drying curve was determined.

The lumber used in this experiment was obtained after sawed from an industrial plant of 8th Region, Chile. Three run of conventional drying were carried out using constant conditions (70/60 °C/°C) and one run of vacuum drying was carried out with constant temperature of 70 (°C), equilibrium moisture content of 9 (%) and a vacuum level of 20 %. Periodically, the evolution of mass and the air and wood temperature were recorded in a data acquisition system.

The results shows that during the conventional drying of radiata pine, the evolution of wood moisture content was satisfactorily represented by a global coefficient of drying of $6.5 \cdot 10^{-5}$ (kg/m².s). During the vacuum drying of radiata pine, the characteristic drying curve suggest a constant drying rate of 11 hours, a critical moisture content of 58 (%) and a maximal drying rate of 1,45 (%/h).

Keywords: drying, vacuum drying, drying kinetics, drying rate, radiata pine.

INTRODUCCION

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 Φ de la madera puede ser representada por 3 etapas de secado (Figura 1).

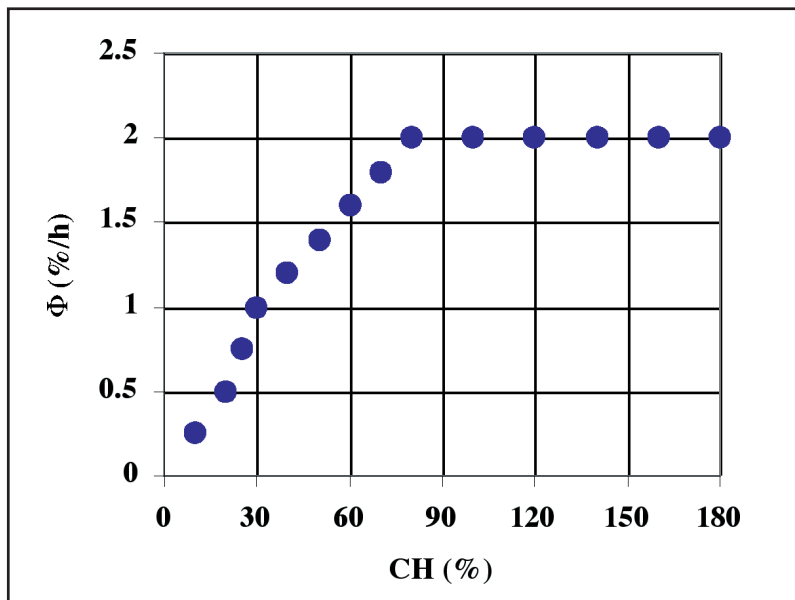


Fig. 1.- Curva teórica de velocidad de secado de la madera.

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 T_H 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, 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 la 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 nacimiento de un frente de evaporación por debajo de la superficie el cual se desplaza hasta el centro de la madera. Ciertas evidencias experimentales dejan ciertas 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 gaseosa) juega un rol importante en el caso del secado bajo vacío.

La cinética del secado puede ser caracterizada por una curva característica basada en los parámetros adimensionales $f(CHR)$ y CHR . Así la velocidad del secado en este caso queda representada por la relación

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

Con $f(CHR)=1$ si $CH>CHC$ ó $f(CHR)=CHR$ si $CH<CHC$.

El contenido de humedad reducido CHR es definido como

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

Y la velocidad máxima Φ_{MAX} se calcula como

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

Donde h es el coeficiente global de transferencia de calor ($\text{kJ/s.m}^2.\text{°C}$), Δh es el calor latente de vaporización (kJ/kg) y $T-T_s$ la diferencia de temperatura entre el ambiente y la superficie de la madera (°C).

Otra cinética del secado de la madera de acuerdo a Chrusciel et al. 1999 y Karabagli et al. 1997, permite representar la velocidad del secado Φ por la diferencia entre la humedad de la madera CH y el contenido de humedad de equilibrio de ésta con el ambiente CHE (ecuación 4). En este contexto la constante de proporcionalidad k es denominada coeficiente global de transferencia de materia (cinética del coeficiente global de secado).

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

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 k ($\text{kg/m}^2.\text{s}$) puede ser obtenido por la correlación siguiente (Broche, 2002)

$$\frac{1}{k} = \left[e^{\left(\frac{2683}{T+273.15} \right)} \right] \cdot \left[0.12 \cdot e + 23.9 \cdot v^{-0.8} \cdot e^{\left(\frac{-(1-HR)}{PSF-CHE} \right)} \right] \quad (5)$$

Donde T es la temperatura ambiente en (°C), v la velocidad del aire en (m/s), HR la humedad relativa ($/$), PSF el punto de saturación de as fibras, CHE el contenido de humedad de equilibrio de la madera ($/$) y e el espesor de la madera (mm).

Por otra parte, el secado bajo vacío favorece 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 reduciendo con ello el punto de ebullición del agua (Perré et al. 1995). 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 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. 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.

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 et al. 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.

MATERIALES Y METODO

Los ensayos de secado fueron llevados a cabo a la escala piloto, en una cámara de secado convencional y un autoclave de secado bajo vacío de aproximadamente 0.3m³ de capacidad, en los laboratorios de secado de la Universidad del Bío-Bío.

Un serie de termocuplas fueron instaladas en la superficie e interior de la madera, así como en el ambiente de secado. Un sistema de adquisición de datos computarizado fue utilizado para el registro continuo cada 1/2 hora de las temperaturas del ambiente de secado y de la madera.

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.). El programa de secado utilizado para el ensayo de secado vacío fue constante: temperatura 70 °C, contenido de humedad de equilibrio CHE de 9 % y una presión de vapor de 0.2 (bar).

La evolución temporal del contenido de humedad experimental (CH_{exp}) fue obtenida mediante el método gravimétrico utilizando muestras testigos. La variación experimental de la masa fue luego ajustada a una curva a través de algoritmos de regresión, utilizando el software Tablecurve 2D.

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

El contenido de humedad teórico CH_{k+1} correspondiente a cada valor experimental se obtuvo por la relación:

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

El CHE (%) fue determinado usando la ecuación de Hailwood-Horrobin (Siau, 1984):

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

Donde las constantes K₁, K₂ y K₃ son determinados por Simpson (Siau, 1984) en función de la temperatura T, esto es:

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

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

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

Y HR es la humedad relativa, calculada por la ecuación:

$$HR = \frac{P_v}{P_s} \quad (11)$$

Siendo P_v la presión parcial del vapor (mm Hg) calculada por la ecuación de Carrier como:

$$P_v = 10 * \left\{ P_{sth} - \frac{(P - P_{sth}) \cdot (T - T_H)}{1546 - 1.44 \cdot T_H} \right\} \quad (12)$$

Y P_s la presión de saturación del vapor (mm Hg) calculada por la ecuación de Dupré, a la temperatura T:

$$P_s = e^{\left(51.29 - \frac{6651}{T+273.15} - 4.53 \cdot \ln(T+273.15) \right)} \quad (13)$$

Con $P_{s_{TH}}$ la presión de saturación (mm Hg) a la temperatura de bulbo húmedo T_H :

$$P_{s_{TH}} = e^{\left(51.29 - \frac{6651}{T_H+273.15} - 4.53 \cdot \ln(T_H+273.15) \right)} \quad (14)$$

La determinación de la velocidad de secado experimental (Φ_{exp}) se obtuvo a partir de la relación entre la variación del contenido de humedad experimental y del tiempo, mediante la siguiente ecuación:

$$\Phi_{exp} = \frac{\Delta CH}{\Delta t} \quad (15)$$

Donde:

ΔCH : variación de contenido de humedad (%).

Δt : intervalo de tiempo (h).

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

DISCUSION RESULTADOS

Cinética secado convencional

En la tabla 1 se muestran los resultados del coeficiente global de transferencia de masa k . Se presenta el coeficiente global de transferencia de masa experimental k_{exp} , el cual fue obtenido a partir de la optimización de los datos recogidos experimentalmente. Además se muestra el coeficiente global de transferencia de masa correlacionado k_{corr} , 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 .

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

Se observa una disminución de k 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 Alvear et al. 2003, Ananías et al. 2001b y 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 k recogido a través del proceso de optimización es de $6.49 \cdot 10^{-5}$ y el k 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 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. 2001a.

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

Coeficiente k ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	Ensayos Secado Convencional			
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	
$k_{exp} \times 10^5$	6.90	5.81	6.77	
$k_{corr} \times 10^5$	8.88	5.83	4.78	
Parámetros	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
e	(mm)	25	50	50
v	(m/s)	3	3	3
A	(m)	26.7	15.3	14.9
T	($^{\circ}\text{C}$)	70	71	66
HR	(%)	58	45	62
CHE	(%)	7.9	5.5	8.3
T_H	($^{\circ}\text{C}$)	58	55	53
M₀	(kg)	112.7	103.7	118.3
Valores iniciales	Unidades	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
HR	(%)	72	38	32
CHE	(%)	10.8	5.3	4.7
CH_{k=0}	(%)	78	126	141

De acuerdo con la figura 2, donde se presentan la variación temporal del contenido de humedad sobre la base del coeficiente global teórico y correlacionado. Se puede observar en las tres curvas de secado, 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 éste y el contenido de humedad experimental son altos en comparación al caso anteriormente observado, lo cual esta relacionado con la magnitud del k obtenido por la correlación. Cuando el k correlacionado es similar al experimental las curvas son también similares (ensayo 2), si el k correlacionado es mayor o menor que el k experimental esto es reflejado en el comportamiento de las curvas de secado en el ensayo 1 (sobrestima la variación temporal del contenido de humedad) y 3 (subestima la variación temporal del contenido de humedad) respectivamente.

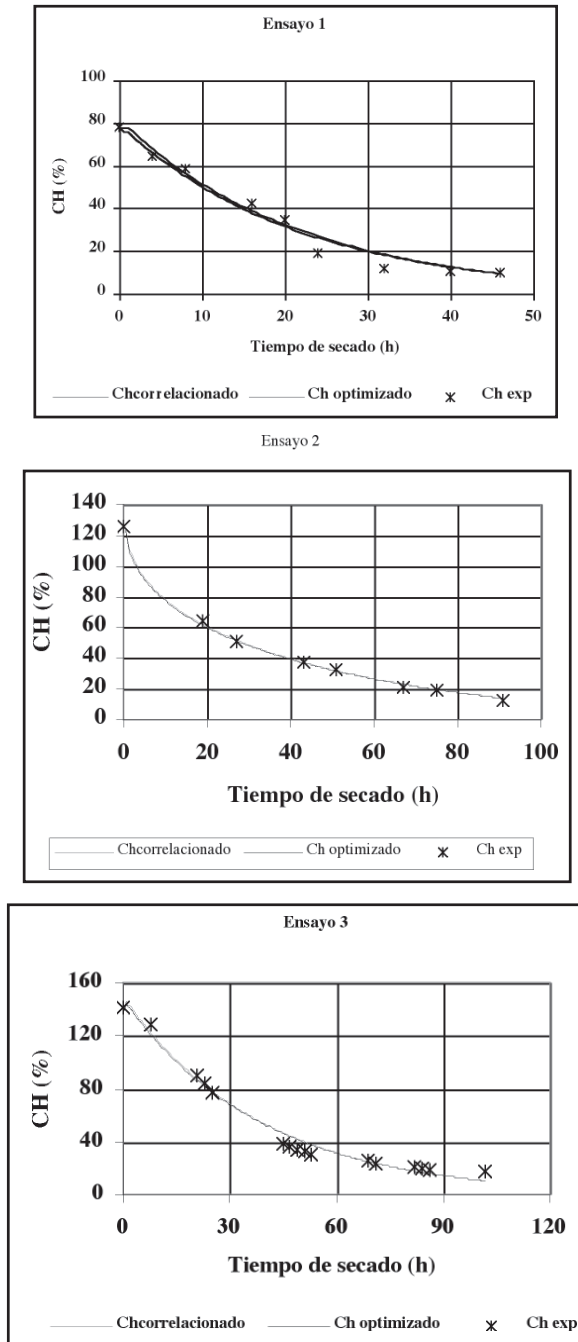


Fig. 2: Curvas de secado para los tres ensayos de secado convencional de pino radiata

Cinética secado bajo vacío.

La evolución de la temperatura experimental en la madera y al interior del autoclave bajo vacío se presentan en la Figura 3

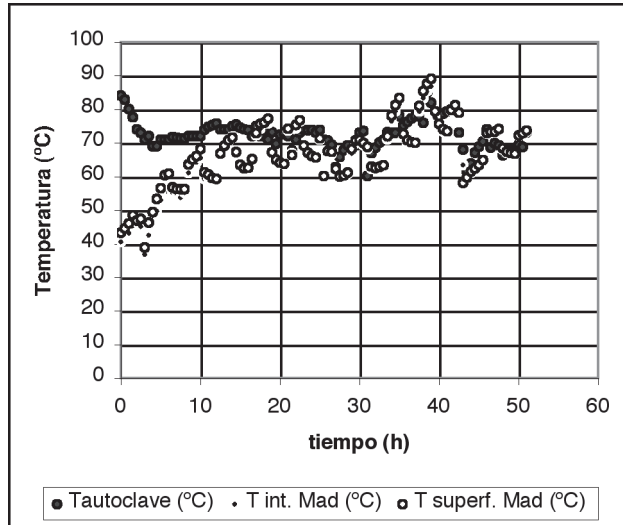


Fig. 3: Comportamiento de la temperatura y la presión en el transcurso del secado.

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.

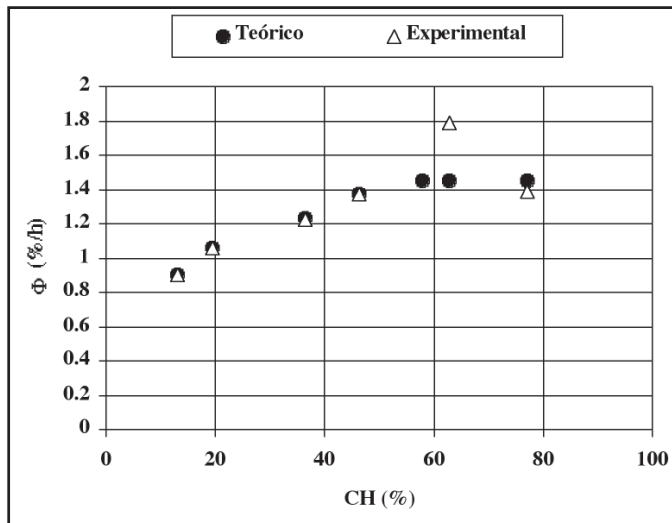


Fig. 4: Comportamiento de la velocidad de secado en función del contenido de humedad.

La curva de secado bajo vacío se presenta en la Figura 4. 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 %) 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).

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 de secado constante 70/60 (°C/°C) y una velocidad del aire de 3 m/s es del orden de $6.5 \cdot 10^{-5}$ (kg/m².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 12 h, con una velocidad de secado máxima de 1.45 (%/h), con un contenido de humedad crítico de 58 %.

BIBLIOGRAFIA

ALVEAR, M.; BROCHE, W.; SALINAS, C.; ANANÍAS, R.A. 2003. Drying kinetic of chilean coigüe: Study of the global drying coefficient. 8IWC: 383-387. Brasov, Romania.

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 (1/2): 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.

CHRUSCIEL, L.; MOUGEL, E.; ZOULALIAN, A.; MEUNIER, T. 1999. Characterisation of water transfer in a low temperature convective wood drier: Influence of the operating parameters on the mass transfer coefficient. Holz Roh Werkstoff 57:439-445.

KARABAGLI, A.; MOUGEL, E.; CHRUSCIEL, L.; ZOULALIAN, A. 1997. Study on a low temperature convective wood drier. Influence of some operating parameters on drier modelling and on the quality of dried wood. Holz Roh Werkstoff 55:221-226.

NEUMANN, R.; MIELKE, A.; BÖNHER, G. 1992. Comparison of conventional and convective vacuum drying of beech. 3rd IWDC: 222-226.

PERRÉ, P.; JOYET, P.; ALÉON, D. 1995. Vacuum drying: Physical requirements and practical solutions. Vacuum drying of wood 95': 7-34.

SIAU, J. 1984. Transport processes in wood. Springer-verlag. Berlín.