

*Publicado en revista FLORESTA 2002 : 108-113.*

*Presentado en II Congreso Iberoamericano de Investigación en Productos Forestales,  
Curitiba, Brasil, Septiembre 2002*

## **MODELACION DEL SECADO DE COIGUE A TEMPERATURA CONVENCIONAL.**

**M. ALVEAR.** Graduados. Depto. Ingeniería en Maderas, Facultad Ingeniería, Universidad del Bío-Bío  
malvear@ubiobio.cl

**W. BROCHE.** Graduados. Depto. Ingeniería en Maderas, Facultad Ingeniería, Universidad del BíoBío.  
wbroche@ubiobio.cl

**C. SALINAS.** Profesor Asistente. Depto. Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,  
Universidad del Bío-Bío. Concepción, CHILE. casali@ubiobio.cl

**R. A. ANANIAS.** Profesor Asociado. Depto. Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería,  
Universidad del Bío-Bío. Concepción, CHILE. ananias@ubiobio.cl

### **RESUMEN**

En este trabajo se estudia un modelo unidimensional que simula el comportamiento transiente de la humedad durante el secado a temperatura convencional de madera de coigüe (*Nothofagus dombeyi*). El modelo, requiere la determinación experimental del coeficiente global de transferencia de materia, mediante ensayos de secado. Los resultados son validados con datos obtenidos a escala industrial. El modelo predice satisfactoriamente las variaciones de humedad de la madera en el transcurso del secado.

**Palabras clave:** Secado. Modelación. Coeficiente de transferencia de masa. Maderas. Coigüe. *Nothofagus dombeyi*. Chile

### **ABSTRACT**

The aim of this work was to study the drying kinetic of Chilean coigüe *Nothofagus dombeyi*. A one-dimensional phenomenological model for low temperature wood drying process based in the global drying coefficient curve is used. Drying cycles were performed to determine the global mass transfer coefficient. The results are validated at the industrial scale. The numerical model accurately predicts the transient moisture content during low temperature drying of Chilean coigüe, also a reasonable agreement was found between model and industrial results.

**Keywords:** Wood drying. Drying modeling. Mass transfer coefficient. *Nothofagus dombeyi*. Chile.

## INTRODUCCION

El coigüe *Nothofagus dombeyi* es apreciado como una especie forestal de importancia industrial y de exportación. La madera madura de coigüe del bosque nativo chileno es semipesada, con una densidad básica promedio en torno de  $520 \text{ kg/m}^3$ . Entre las propiedades apreciables del coigüe se destacan su grano fino, vetado suave, buena trabajabilidad, alta resistencia mecánica y media resistencia a la pudrición. Por consiguiente el coigüe ha encontrado una gran variedad de aplicaciones en estructuras, viviendas, pisos, parquets, durmientes, muebles, etc. (Díaz-Vaz y Poblete, 1991).

Sin embargo el secado de la madera aserrada de coigüe es considerado como difícil o muy difícil. La contracción excesiva e irregular producida por el colapso, que es observado frecuentemente en el secado de coigüe, ha contribuido a darle la reputación de ser una de las especies de madera en que el secado ocasiona las mayores pérdidas. Como causa principal de las dificultades de secado del coigüe se considera la presencia de tilosis en casi todos los vasos y otras incrustaciones entre las cavidades celulares lo que implica una muy baja permeabilidad (Kauman y Mittak 1964; Kauman y Mittak 1966; Rosende y Bluhm 1966).

Diversos pretratamientos en vapor o agua caliente se han realizado para modificar las incrustaciones entre las cavidades celulares de la madera y mejorar con ello la cinética del secado y la calidad de la madera seca. (Peredo y Figueroa 1992; Herrera y Díaz-Vaz, 1996; Ananías et al. 2000). Peredo y Figueroa 1992, encontraron una disminución de 35 % en el tiempo de secado y, una reducción bastante significativa en el colapso residual de la madera en coigüe de 25 mm pretratada por 48 h en agua caliente a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . El efecto en la calidad (regular) fue leve y, más que una alta intensidad de defectos

presentó una alta frecuencia de ellos, principalmente por torceduras. De acuerdo a Herrera y Díaz-Vaz, 1996, el aumento de la permeabilidad es ocasionado por la modificación de las sustancias extraíbles depositadas entre los espacios celulares, tales como la cavidad celular (lumen) y las punteaduras de las células. Ananías et al. 2000 muestran que el pretratamiento en ambiente saturado por 4 h a 90 °C aumenta en más de un 7 % la velocidad del presecado de coigüe.

Por otra parte, diversos modelos son utilizados para predecir el comportamiento de la humedad de la madera y apoyar la conducción y el control del secado. Estos modelos se fundamentan en los fenómenos de transporte de calor y masa, en las leyes difusionales y en las leyes fenomenológicas (Broche et al. 2002). Los modelos empíricos presentan la ventaja de ser simples y aplicables a toda una carga de madera, pero requieren la determinación de coeficientes experimentales (Ananías et al. 2001a).

En este trabajo se estudia el comportamiento transiente de la humedad durante el secado a temperatura convencional del coigüe cuyo modelo fenomenológico es basado en un coeficiente global de transferencia de materia (modelo coeficiente global de secado).

### **Fundamentación Teórica**

De acuerdo a Karabagli et al. (1997) bajo condiciones de secado constantes y homogéneas y despreciando las pérdidas térmicas se pueden obtener de la conservación de entalpía y masa, en el aire de secado y en la madera, para un instante de tiempo  $\tau$  y  $\tau+\Delta\tau$ , las siguientes ecuaciones:

i) Del balance de masa en el aire

$$G * (W_S - W_E) = k * S * (CH - CHE) \quad (1)$$

ii) Del balance de masa en la madera

$$-M_0 * \frac{\partial CH}{\partial t} = k * S * (CH - CHE) \quad (2)$$

iii) Del balance entálpico en el aire

$$G * \left[ \{c_{pa} * T_S + W_S * (\Delta h_0 + c_{pV} * T_S)\} - \{c_{pa} * T_E + W_E * (\Delta h_0 + c_{pV} * T_E)\} \right] = k * S * \Delta h_V * (CH - CHE) - h * S * (T - T_M) \quad (3)$$

iv) Del balance entálpico en la madera

$$M_0 * (c_{pS} + c_{pL} * CH) * \frac{\partial T_M}{\partial t} = -G * \left[ c_{pa} * (T_S - T_E) - (c_{pL} * T_M) * (W_S - W_E) + c_{pV} * (W_S * T_S - W_E * T_E) - \Delta h_0 * (W_S - W_E) \right] \quad (4)$$

La solución numérica del sistema de ecuaciones 1 a 4, permite obtener valores transitorios de las variables como la humedad y temperatura de la madera y del ambiente de secado (CH, T<sub>M</sub>, W y T), para lo cual son necesarios el conocimiento de las condiciones iniciales de estas variables y los coeficientes globales de transferencia de masa *k* y calor *h*.

### **Solución numérica en diferencias finitas.**

Para determinar el contenido de humedad teórico correspondiente a cada valor experimental ( $CH^{j+1}$ ), la ecuación 2 es descretizada mediante el Método de Diferencias Finitas (método explícito) de lo cual resulta la siguiente relación:

$$CH^{j+1} = \frac{(2-K) \cdot CH^j}{2+K} + \frac{K \cdot (CHE^j + CHE^{j+1})}{2+K} \quad (5)$$

Donde *j* y *j*+1 indican el tiempo  $\tau$  y  $\tau+\Delta\tau$  respectivamente y;

$$K = \frac{k \cdot S \cdot \Delta\tau}{M_0} \quad (6)$$

El coeficiente de masa  $k$  se obtiene minimizando la siguiente función de error:

$$E = ABS \frac{(CH_{ex} - CH_T)}{CH_{ex}} \cdot 100 \quad (7)$$

## METODOLOGIA

Los ensayos experimentales a escala piloto se llevan a cabo en un horno convectivo de aproximadamente 0.3 m<sup>3</sup> de capacidad efectiva. Este dispone de un sistema de adquisición de datos conectado a una computadora que permite obtener el registro de las temperaturas del ambiente de secado y de la madera. La masa de la madera fue registrada manualmente cada 8 horas de secado (método gravimétrico), cuyos valores son ajustados a una curva a través de algoritmos de regresión. Un programa de secado a temperatura y velocidad del aire constante fue utilizado para las cuatro experiencias realizadas (60 °C y 40 °C para bulbo seco y húmedo respectivamente)<sup>1</sup>. Los parámetros variables fueron el espesor de la madera: 19 y 30 mm y, la velocidad del aire: 1,5 y 3 m/s.

El coigüe fue recogido recién aserrado y al azar en una planta industrial del sur de Chile. Se prepararon piezas cepilladas de 110 mm de ancho x 920 mm de largo. La madera fue dispuesta en el secador en una sola pila de 10 niveles en altura, empalillada con separadores secos y cepillados de 25 mm de espesor.

---

<sup>1</sup> Este programa de secado rápido a temperatura constante fue utilizado para visualizar la capacidad de predicción del modelo y no para estudiar la calidad final de la madera seca.

Datos experimentales de las variaciones de la humedad de la madera, la temperatura y la humedad del ambiente de secado fueron recogidos en un horno de 100 m<sup>3</sup> operando en una planta industrial del sur de Chile.

El conjunto de ecuaciones 1 a 4 fue programado en Fortran y resuelto iterativamente por el método de Gauss-Seidel. Las propiedades termodinámica del aire fueron calculadas basándose en correlaciones empíricas.

## **RESULTADOS Y DISCUSION**

Los gráficos de la figura 1a-1d muestran las curvas de secado experimental y calculadas basándose en el modelo del coeficiente global de secado. El coeficiente global de secado  $k$  varió entre 0,12 y 0,07 (kg.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) en las maderas de 19 mm y 30 mm respectivamente, esto representa un orden de magnitud del coeficiente global de secado similar a la reportada para maderas europeas, Karabagli et al (1997) encontró para maderas comparables al coigüe de 27 mm de espesor, un coeficiente global de secado de 0,1 (kg.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>). Se observa, además en la Figura 1 que la humedad de la madera es satisfactoriamente simulada por el modelo basado en el coeficiente global de secado. El modelo mejora en precisión cuando las condiciones del ambiente de secado logran ser bien controladas. La mayor desuniformidad de las temperaturas incrementa el error de la humedad modelada en los ensayos por debajo de 10 %. El cambio a la escala industrial incrementa el error en la predicción de la humedad debido a las mayores dificultades para mantener las condiciones del ambiente de secado homogéneas a través de un horno industrial. El programa de secado industrial fue escalonado en tres etapas que variaron entre 44/42 (°C/°C) y 62/44 (°C/°C), manteniendo una velocidad del aire constante de 2,5 (m/s); la madera fue también pretratada al inicio del secado para homogeneizar el color y bajo el rango higroscópico se introdujeron tratamientos intermedios con ambiente saturado para igualar la humedad. El modelo se ajusta a los

experimentos con un error de 13 %, este es comparable al obtenido a la escala de laboratorio, no obstante que por debajo del punto de saturación los tratamientos de igualado aplicados en el secado industrial, limitan la modelación industrial en esta etapa. En el secado industrial el coeficiente global de secado promedio fue de 0,02 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), esto es un poco por debajo de los valores encontradas a la escala de laboratorio pero son consistentes con el empleo de condiciones de secado más suaves.

Las curvas experimentales de la velocidad del secado mostradas en los gráficos 1e y 1f carecen de la etapa de secado constante observándose solamente la etapa de secado decreciente. En una primera zona decreciente la velocidad del secado de coigüe se ve favorecida por el movimiento capilar del agua libre y un frente de evaporación muy cerca de la superficie. En maderas más delgadas, esto es, 19 mm la velocidad del secado varía entre 0,12 y 0,04 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), esto es entre 1 y 2 (%/h). La madera más gruesa de 30 mm, la velocidad del secado en esta región de secado decreciente varia entre 0,1 y 0,02 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), esto es entre 1,5 y 0,2 (%/h). La velocidad del aire muestra mayor influencia particularmente en esta madera más gruesa.

Los resultados a la escala industrial muestran similar comportamiento que los ensayos a la escala piloto, esto es, la inexistencia de la etapa de secado constante y una zona de velocidad decreciente formada por dos rectas de diferente pendiente cuyo punto de intersección es alrededor de 30 %. Este mismo comportamiento fue inicialmente reportado por Ananias et al 2001b. La velocidad del secado en la primera etapa de secado decreciente varió entre 0,04 y 0,01 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), esto es, entre 0,2 y 0,08 (%/h).

En el rango higroscópico el secado del coigüe es gobernado fundamentalmente por el movimiento interno de agua ligada, lo que favorece la teoría de la existencia de una proporcionalidad entre el coeficiente global de transferencia de materia y el coeficiente

de difusión del agua ligada en la madera, tal como reportado por Chrusciel et al. 1999 para maderas europeas.

## **CONCLUSIONES**

La humedad de la madera durante el secado a temperatura convencional de coigüe es satisfactoriamente descrita por una modelación unidimensional basada en el coeficiente global de secado. Los resultados son validados con datos obtenidos a la escala industrial en un horno de 100 m<sup>3</sup>.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la Dirección de Investigación de la Universidad del Bío-Bío el financiamiento de este trabajo a través del proyecto de reinserción N° 0171103.

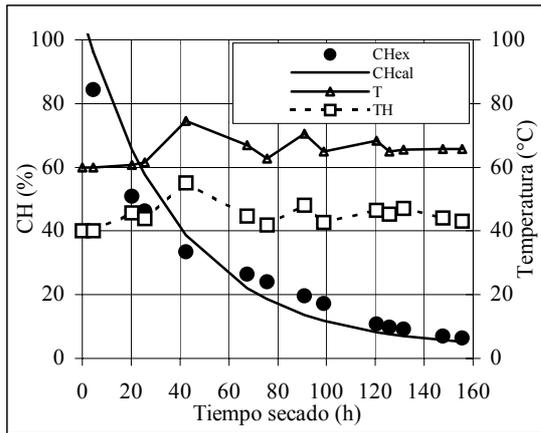
A la Dirección de Transferencia Tecnológica de la Universidad del Bío-Bío las facilidades para usar el laboratorio y los equipos de secado. Además, agradecemos a la empresa SOSUR S.A. la donación de la madera necesaria para los ensayos experimentales

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

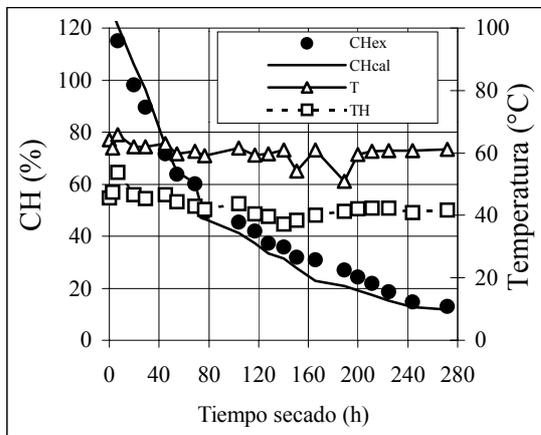
- ANANIAS, R.A.; BROCHE, W.; SALINAS, C.; RUIZ, P. 2001a. Modelación del secado convencional del coigüe. Parte 1. Fundamentación teórica. **MADERAS: Ciencia y Tecnología** 3(1/2):2001 (aceptado).
- ANANÍAS, R.A.; CHRUSCIEL, L.; MOUGEL, E.; ZOULALIAN, A. 2001b. Drying rate modelling of convective wood drying at low temperature. (Unpublished data).
- ANANÍAS, R.A. ; CERDA, C.; CORTÉZ, H. ; HERNÁNDEZ, G. 2000. Impacto del precalentamiento en ambiente saturado sobre la velocidad del presecado de coigüe. *CD-Rom IX REUNIÓN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN PRODUCTOS FORESTALES*. Concepción, Chile.
- BROCHE, W.; ANANIAS, R.A.; SALINAS, C.; RUIZ, P. 2002. Modelación del secado convencional del coigüe. Parte 2. Resultados experimentales. (Unpublished data)
- 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.
- DIAZ-VAZ, J.E.; POBLETE, H. 1991. Inmersión en agua de madera aserrada de coigüe. *ACTAS VII REUNION INVESTIGACION Y DESARROLLO EN PRODUCTOS FORESTALES* 1:241-259, Valdivia, Chile.
- HERRERA, M.; DIAZ-VAZ, J.E. 1996. Pretratamiento de inmersión en agua de madera de coigüe. *ACTAS VIII REUNION INVESTIGACION Y DESARROLLO EN PRODUCTOS FORESTALES* 1:381-396, Santiago, Chile.
- 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.
- KAUMAN, W.G.; MITTAK, G. 1966. **Ensayos de secado del coigüe**. Informe Técnico N° 25, INFOR, Chile.
- KAUMAN, W.G.; MITTAK, G. 1964. **Problemas del secado del coigüe**. Informe Técnico N° 21: 157-166. INFOR, Chile.
- PEREDO, M.; FIGUEROA, R. 1992. Secado artificial de madera de coigüe *Nothofagus dombeyi*. **Bosque** 13(2):45-55.
- RESSEL, J.; WELLING, J. 1987. Das trocknungsverhalten des holzes coigüe. **Holz-Kunststoffverarbeitung** 22(2):150-153; 22(3):246-247.
- ROSENDE, R.; BLUHM, E. 1966. **Ensayos de secado en coigüe y ulmo en tablas de largo comercial**. Informe Técnico N° 26, INFOR, Chile.

## LISTA DE SÍMBOLOS

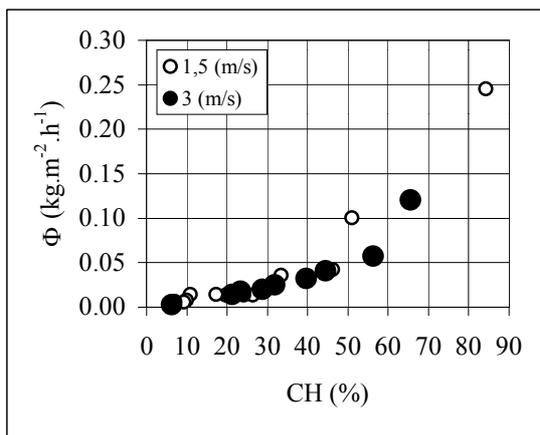
|              |   |
|--------------|---|
| CH           | Contenido de humedad de la madera ( $\text{kg.kg}^{-1}$ )                               |
| CHE          | Contenido de humedad de equilibrio ( $\text{kg.kg}^{-1}$ )                              |
| $C_{pv}$     | Calor específico del vapor a presión constante ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )   |
| $C_{pS}$     | Calor específico de la madera ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )                    |
| $C_{pL}$     | Calor específico del líquido ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )                     |
| $C_{pa}$     | Calor específico del aire ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )                        |
| e            | Espesor madera (m)  |
| G            | Flujo másico de aire ( $\text{kg.h}^{-1}$ )   |
| h            | Coefficiente convectivo de transferencia de calor ( $\text{kJ.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ ) |
| k            | Coefficiente global de secado ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ )                      |
| K            | Constante de secado   |
| $M_0$        | Masa anhidra de la madera (kg)  |
| S            | Superficie de intercambio entre la madera y el aire ( $\text{m}^2$ )                    |
| T            | Temperatura del aire seco ( $\text{°C}$ )   |
| $T_E$        | Temperatura a la entrada de la pila de madera ( $\text{°C}$ )                           |
| $T_H$        | Temperatura del aire húmedo ( $\text{°C}$ )   |
| $T_M$        | Temperatura de la madera ( $\text{°C}$ )  |
| $T_S$        | Temperatura del aire seco a la salida de la pila de madera ( $\text{°C}$ )              |
| W            | Humedad específica del aire a la temperatura del aire seco ( $\text{kg.kg}^{-1}$ )      |
| $W_E$        | Humedad específica del aire a la entrada de la pila de madera ( $\text{kg.kg}^{-1}$ )   |
| $W_S$        | Humedad específica del aire a la salida de la pila de madera ( $\text{kg.kg}^{-1}$ )    |
| $\Delta h_0$ | Calor latente de vaporización a $T=0 \text{ °C}$ ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ )                |
| $\Delta h_v$ | Calor latente de vaporización ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ )                                   |
| $\Delta t$   | Intervalo de tiempo (h)   |
| $\Phi$       | Velocidad del secado ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ )                               |



a) Ensayo 1

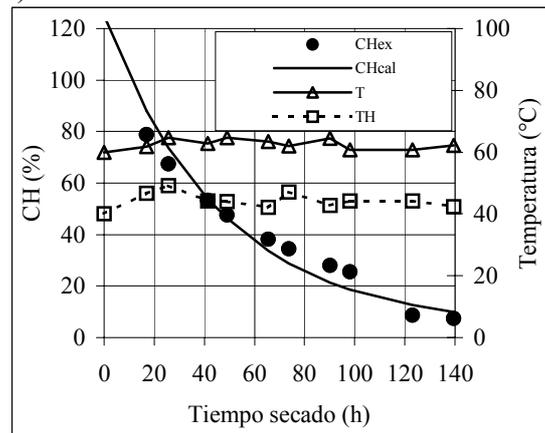


c) Ensayo 3

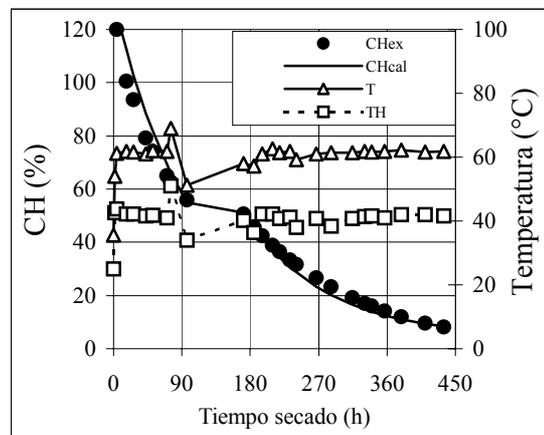


e) Velocidad de secado ensayos 1 y 2

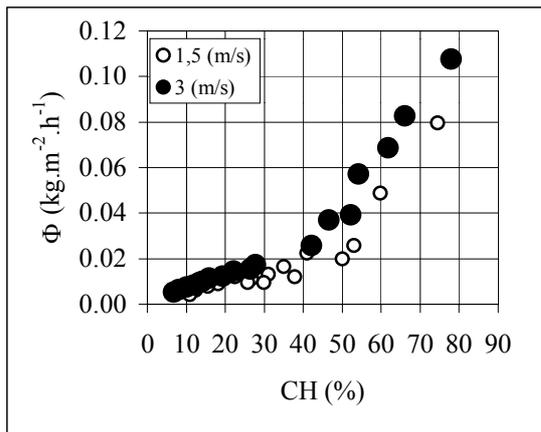
d)



b) Ensayo 2



d) Ensayo 4



**Figura 1** : Curvas de secado

f) Velocidad de secado ensayos 3 y 4