

APTITUD DE DIFERENTES MADERAS DE CONIFERAS Y FRONDOSAS AL SECADO CON VAPOR SOBRECALENTADO. DETERMINACION DEL PUNTO FINAL DEL SECADO

H. ALVAREZ NOVES
J. I. FERNANDEZ-GOLFIN
Dpto. Industrias Forestales, CIT-INIA
Apdo. 8111 - 28080 Madrid (España)

RESUMEN

Se evalúa la aptitud de la madera de *Pinus pinaster*, *radiata*, *sylvestris* y *nigra*, de procedencia española, así como la de *Eucalyptus globulus* y *Populus* sp., al secado con vapor sobrecalentado. Los mayores problemas en el secado de la madera de coníferas parecen derivarse del contenido de resina y de la existencia de nudos saltadizos. En las frondosas (*Populus* y *Eucalyptus*) los mayores problemas son los derivados de la falta de permeabilidad con tendencia al agrietamiento y colapso.

Se evalúa, asimismo, la aplicabilidad del método de determinación del punto final del secado mediante el control de la temperatura interior de la madera.

PALABRAS CLAVE: Secado con vapor sobrecalentado
Secado
Secado a alta temperatura
Punto final del secado

INTRODUCCION

Desde antiguo se sabe que la madera puede ser secada rápidamente en una atmósfera de vapor sobrecalentado. La primera patente, de Allen y Campbell (US Pat. n.º 64398), data de 1867, si bien hubo otras posteriores, de Uphus y Chapman (US Pat. n.º 903635) y de Tiemann (US Pat. n.º 1268), en 1908 y 1918, respectivamente.

De acuerdo con Kollmann y Coté (1968), se considera secado a alta temperatura, en sentido general, aquél que se efectúa a una temperatura seca superior a 100 °C. Sin embargo, según cual sea la temperatura húmeda se pueden considerar dos casos:

- 1.º Si se mantiene sensiblemente inferior al punto de ebullición, lo que es indicativo de que el secado se efectúa en una mezcla gaseosa de aire y vapor, el proceso es denominado «secado a alta temperatura».

Recibido: 18-6-93

Aceptado para su publicación: 26-11-93

- 2.º Si se mantiene igual o ligeramente inferior al punto de ebullición, lo que es indicativo de que el secado se efectúa en una atmósfera pura de vapor, sin presencia de aire, el secado se le denomina «secado en vapor sobrecalentado».

Desde el punto de vista de la regulación del secadero, el primer método resulta problemático, ya que obliga al conocimiento de la temperatura del bulbo húmedo, o en su defecto de la humedad de equilibrio de la madera, lo que por encima de los 100 °C es dificultoso. Por otra parte, la determinación del momento final del secado debe hacerse por cálculo de tiempos, ya que los sistemas de medición de la humedad de la madera por medidas eléctricas no son fiables a estas temperaturas.

Por el contrario, la regulación del secadero en el segundo método es muy sencilla, ya que sólo se necesita conocer la relación que liga la temperatura del vapor con la humedad de equilibrio de la madera, la cual es conocida desde hace tiempo. En estas circunstancias, el control del proceso se puede hacer regulando exclusivamente la temperatura del vapor mediante termostatos y determinando el momento final del secado en base a la temperatura alcanzada en el centro de varias piezas testigo y la relación que liga a esta temperatura con la humedad de equilibrio de la madera (Panow, Nester, 1984).

Según Kollmann, Coté (1968) el secado en vapor sobrecalentado es válido para las coníferas y la mayor parte de las frondosas presecadas al aire, excepto el roble, el cual tiene tendencia a desarrollar fendas internas a temperaturas superiores a 65 °C.

Koch (1972), al explicar el mecanismo del movimiento del agua libre por encima de los 100 °C, relaciona la permeabilidad de la madera con la facilidad del movimiento del vapor de agua a su través y, por tanto, con la aptitud de las diferentes maderas a este tipo de secado.

Los programas de secado, por este método, más adecuados para el pino pinaster (pino marítimo), en piezas de 27 mm de espesor, han sido estudiados por Martin *et al.*, (1989), si bien su extrapolación a otros espesores, procedencias y especies debe ser comprobada.

Panow, Nester (1985) establecieron, para el secado a alta temperatura (en mezcla aire-vapor) ecuaciones que ligaban la temperatura en el centro de las piezas con la humedad final de éstas, siempre que la humedad inicial no fuera inferior al 45 p. 100 y las secciones de madera estuvieran contenidas dentro de un cierto rango.

Termopares ubicados en el centro de las piezas testigo como medio de determinar el punto final del secado han sido empleados por varios autores (Panow, Nester, 1985). De los dos métodos utilizados, penetración longitudinal y transversal, el que resulta más adecuado industrialmente es el segundo, sugerido por E. Littee (citado por Panow, Nester, 1985), si bien añade la imprecisión en la medida, originada por la transmisión térmica a lo largo de la vaina del termopar.

La mayor crítica que puede hacerse al método de los termopares como medio de determinar el punto final del secado es la necesidad de inferir de una medida de temperatura en el centro de la pieza el contenido de humedad de toda ella. Lógicamente esta determinación debe venir afectada por sensibles imprecisiones, debidas fundamentalmente a la sección de la pieza, la profundidad de penetración de los termopares, el tamaño de los termopares, la conductividad térmica por la vaina del termopar y la especie de madera.

MATERIAL Y METODOS

Secadero

El secadero, de 0,25 m³ de capacidad, fue diseñado y construido por el propio INIA en 1990. Tiene unas dimensiones interiores de 151 × 80 × 80 cm, estando construido su interior de chapa de acero inoxidable con soldaduras del mismo material.

La puerta frontal, dividida en dos hojas, tiene una forma interior cóncava para evitar, en la medida de lo posible, turbulencias en el flujo gaseoso interior.

El sistema de circulación interna del flujo gaseoso consta de un ventilador axial de 55 cm de diámetro y 1,5 kw, provisto de motor de velocidad variable ubicado en el exterior. La velocidad máxima del flujo gaseoso es de 5 m/s.

La cámara de secado, aislada perimetralmente con lana de roca de 55 cm de espesor, posee una válvula para regular la presión interna y diversos conductos para pasar al interior los termopares y demás elementos necesarios para la regulación y control. Todos estos elementos y los arriba mencionados están contruidos y ubicados de forma que la estanqueidad del recinto interior sea máxima.

El sistema de calefacción consta de cuatro resistencias eléctricas, dos de 1,5 kw y otras dos de 4,5 kw.

Como elemento accesorio, conveniente en la fase de calentamiento, el secadero incorpora un vaporizador a presión atmosférica, de 6 kw, marca DEFENSOR, modelo Devapor MK3.

Regulación y control

El sistema de control se compone de siete termopares tipo T, uno para la medición de la temperatura interior, otro para regular el vaporizador y cinco más para la medición de la temperatura interna de la madera, así como de dos reguladores y un termostato de seguridad.

Los termopares empleados para la medición de la temperatura de la madera, del tipo T y de 3 mm de diámetro, son introducidos transversalmente por el centro del canto de cinco testigos, hasta una profundidad de 50 mm, sellándose con silicona los bordes del orificio practicado. Los termopares siempre son colocados a una distancia de las testas superior a 50 cm.

El termopar empleado para la medición de la temperatura interior es colocado en medio del flujo gaseoso, dándole una forma de U para evitar condensaciones en su punta.

Todos los termopares anteriores son conectados a sus correspondientes reguladores, o a un registrador (PC).

El programa de regulación seguido, para obtener una humedad final del 10 p. 100, fue el siguiente:

- *Fase de calentamiento.* Se consigna una temperatura interior de 100 °C y se ajusta la potencia calorífica de forma que se alcancen 95 °C en el interior de la madera en dos horas y media. En esta fase se enciende el vaporizador para evitar un secado prematuro.
- *Fase de secado.* Se consigna una temperatura interior de 120 °C, manteniéndose estas condiciones hasta que la temperatura media de los testigos alcanza la deseada (103-105 °C), en función de la especie y grosor, lo que corresponde a una humedad de equilibrio (Fig. 1) de 13,5 a 11,8 p. 100.
- *Fase de igualación.* Se baja y se mantiene la temperatura interior en 107 °C (HEH de 9,2 p. 100) hasta que la madera alcanza de nuevo la temperatura requerida (103-105 °C).

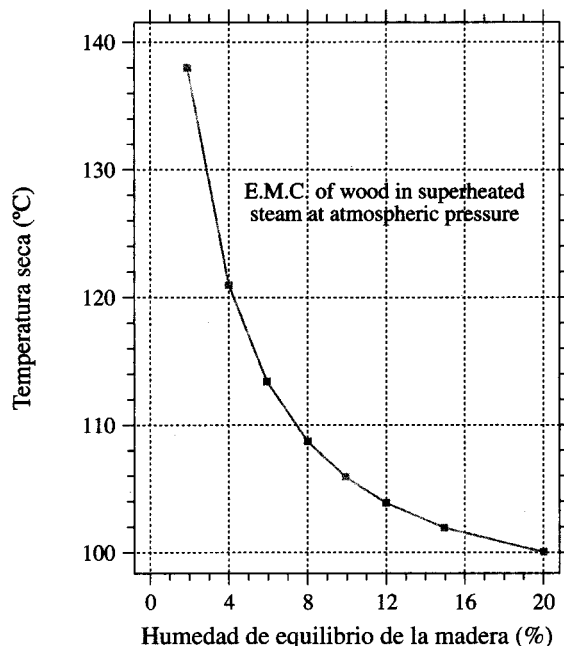


Fig. 1.—Humedad de equilibrio de la madera en vapor sobrecalentado a presión atmosférica
 EMC of wood in superheated steam at atmospheric pressure

Carga del secadero

Se formó una pila, convenientemente enrastrada, compuesta por 36 tablas de 27 mm de grosor ó 24 tablas de 50 mm, de 150 cm de longitud y 150 mm de anchura, dispuestas en 12 y 8 pisos respectivamente, con tres tablas por piso.

Las especies y procedencias empleadas fueron *Pinus radiata* (Guipúzcoa), *Pinus pinaster* var. *Mesogensis* (Cuenca), *Pinus sylvestris* (Soria), *Pinus nigra* (Alava), *Eucalyptus globulus* (Pontevedra) y *Populus* sp. (Burgos). Todas las maderas fueron adquiridas en aserraderos de entre los lotes destinados a comercialización, previo secado.

Estas especies fueron escogidas por su interés comercial y abundancia en España y por aportar la mayor cantidad posible de variables al estudio.

La selección se hizo directamente en aserradero para que las maderas representasen, en la medida de lo posible, a las comercializadas de cada una de las especies. No se seleccionó el pino silvestre tipo «Valsaín» por considerar, en principio, la alta calidad y precio de esta madera inadecuada para este tipo de secado. En cuanto al pino pinaster se seleccionó la procedencia conquense por ser la que podría presentar mayores problemas por sus elevados contenidos en resina.

En todos los casos se efectuaron experiencias previas para la determinación de los valores más adecuados de T_m y T_i . Determinados estos valores, se efectuaron tres experiencias por especie, salvo en el caso del *Eucalyptus globulus* cuyos resultados fueron negativos desde la primera experiencia.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 1 pueden verse los resultados obtenidos en las diferentes pruebas efectuadas, correspondiendo todos ellos, salvo en el *Eucalyptus globulus*, a la media de tres experiencias.

La Tabla 2 recoge una evaluación de la calidad del secado, de acuerdo con las recomendaciones del EDG (Alvarez Noves, Fernández-Golfín Seco, 1992).

Del análisis de ambas tablas se desprenden los siguientes factores condicionantes de la calidad del secado:

- 1.º *Contenido en resina.* Los altos contenidos en resina (*P. pinaster*) son incompatibles con este método de secado, ya que al producirse su fluidificación, migra hacia la superficie, donde se cristaliza, produciendo manchas en la madera. También da lugar a fuertes gradientes de humedad, tanto mayores conforme más elevado sea el espesor, debido a la pérdida de permeabilidad. Por otra parte, elevados contenidos en resina suelen ir acompañados de humedades iniciales muy dispersas, lo que, como se verá más adelante, influye negativamente en la calidad final del secado.
- 2.º *Presencia de nudos muertos.* Estos nudos, sobre todo si van acompañados de altos contenidos en resina (*P. radiata* y *pinaster*), tienen tendencia a desprenderse, dejando un orificio manchado perimetralmente por incrustaciones de resina. Los nudos sanos, sin embargo, no tienen tendencia a desprenderse.
- 3.º *Humedad inicial.* El método resulta especialmente indicado para las coníferas desde el estado verde. La dispersión de la humedad inicial, bien debida a la heterogeneidad de la materia prima empleada (*P. sylvestris*) o a la presencia de un alto contenido de resina (*P. radiata* y *pinaster*), produce una elevada dispersión en la humedad final.
- 4.º *Espesor.* Como norma general, el secado presenta mayor calidad si el espesor es de 27 mm que si es de 50 mm. Los espesores altos suelen traer consigo mayores gradientes de humedad y agrietamientos.
- 5.º *Permeabilidad.* La falta de una adecuada permeabilidad (*E. globulus*) es causa suficiente para la aparición de cementado, bolsas de humedad, colapso y agrietamiento. Cuando esta falta de permeabilidad es debida a anomalías estructurales (corazón negro del chopo) o químicas (contenido en resina, ciertos extractivos, etc.), la madera «normal» suele secar perfectamente (*Populus* sp.), no ocurriendo lo mismo cuando el defecto está presente.
- 6.º *Tendencia al colapso.* La tendencia de una madera a presentar colapso (*E. globulus*), imposibilita el uso de este método para su secado.
- 7.º *El programa de secado.* Aunque no se ha pretendido hacer una minuciosa investigación sobre el programa más adecuado a cada especie utilizada, del análisis de los empleados (Tabla 1) se desprende claramente que el programa influye decisivamente en el valor del gradiente de humedad y en la dispersión de la humedad final de la madera en la pila. Del análisis de los resultados obtenidos (Tablas 1 y 2), parece deducirse que, si bien serían necesarias comprobaciones finales, T_{mi} debe ser del orden de 2 °C inferior a T_{ms} , debiéndose elegir T_{ms} en función de la humedad final deseada (Fig. 1), si bien debe tenerse en cuenta que pueden aparecer diferencias sensibles (2-3 p. 100) entre las humedades previstas por las medidas de temperatura de la madera y las humedades reales, debidas a la especie, dimensiones de las piezas y temperatura seca interior.

TABLA 1
RESUMEN SECADO

Prueba	Especie	Espesor (mm)	Humedad madera		Testigos (%)	Fase de secado			Fase de igualación			Tiempo total (h)
			Inicial (%)	Final (%)		T _s (°C)	T _{ms} (°C)	HEH _s (%)	T _i (°C)	T _{mi} (°C)	HEH _i (%)	
1	<i>P. radiata</i>	27	116	10,8	10	120	103	13,5	107	103	13,5	20
2	<i>P. radiata</i>	50	98	6,8	7,2	120	103	13,5	107	105	11,8	41
3	<i>P. pinaster</i>	27	54	11	11,6	120	103	13,5	107	105	11,8	15
4	<i>P. pinaster</i>	50	66	18	26,4	120	103	13,5	107	102	15,5	19
5	<i>P. sylvestris</i>	27	69	11,8	10,7	120	107	9,2	107	105	11,8	15
6	<i>P. sylvestris</i>	50	73	9,8	9,0	120	110	7,5	107	106	10	38
7	<i>P. nigra</i>	27	85	9,6	10,4	120	103	13,5	107	103	13,5	20
8	<i>P. nigra</i>	50	81	11,8	11,0	120	103	13,5	107	103	13,5	37
9	<i>E. globulus</i>	27	106	53 (*)	—	120	105	11,8	107	103,5	12,5	19
10	<i>Populus</i> sp.	27	90	11	10,3	120	103	13,5	107	103,5	12,5	15
11	<i>Populus</i> sp.	50	96	13	7,9	120	103	13,5	107	103	13,5	27

(*) Se produjeron gran cantidad de bolsas de agua.

T_s, T_i: Temperatura dentro del secadero en las fases de secado e igualación.

T_{ms}, T_{mi}: Temperatura de la madera (medida por termopares) en el momento final de las fases de secado e igualación.

HEH_s, HEH_i: Humedad de equilibrio de la madera que corresponde a la temperatura de la madera alcanzada al final de las fases de secado e igualación.

TABLA 2
EVALUACION CALIDAD SECADO

Prueba	Especie	Espesor	Humedad final		Tensio- nado	Agrietamiento			Deforma- ciones	Coloración	Observaciones
			Dispersión (*)	Gradiente (**)		Colapso	Super- ficial	Interno			
1	<i>P. radiata</i>	27	±3	1,44	L	NO	NO	NO	NO	NO	Nudos saltadizos
2	<i>P. radiata</i>	50	±3	2,42	L	NO	NO	NO	L	NO	Nudos saltadizos
3	<i>P. pinaster</i>	27	±4	2,64	L	NO	NO	NO	NO	NO	Nudos saltadizos
4	<i>P. pinaster</i>	50	±5	10,8	L	NO	L	NO	NO	NO	Nudos saltadizos
5	<i>P. sylvestris</i>	27	±4	1,84	L	NO	NO	NO	NO	NO	Hi muy dispersa
6	<i>P. sylvestris</i>	50	±2	1,44	L	NO	NO	NO	L	NO	-
7	<i>P. nigra</i>	27	±2	2,50	L	NO	NO	NO	NO	NO	-
8	<i>P. nigra</i>	50	±2	4,98	L	NO	NO	NO	L	NO	-
9	<i>E. globulus</i>	27	-	-	I	I	I	I	I	NO	Cementado
10	<i>Populus</i> sp.	27	±4	1,28	NO	I (1)	NO	NO	NO	NO	Bolsas agua
11	<i>Populus</i> sp.	50	±6	2,38	L	I (1)	NO	NO	L	NO	Bolsas agua

(*) Definida como el intervalo de humedades para el cual el 90 p. 100 de la partida está incluida.

(**) Definido como la diferencia media, en porcentaje, entre la medida central y la superficial.

(L) Ligero, (M) Mediano, (I) Intenso.

CONCLUSIONES

- 1.^a El método de secado en vapor sobrecalentado es apto para el secado rápido de maderas de coníferas y frondosas permeables, homogéneas y de bajo contenido de resina, y preferentemente de espesores reducidos.
- 2.^a Los programas de secado propuestos, si bien necesitan un ajuste posterior, producen una elevada calidad de secado.
- 3.^a El uso de termopares ubicados en el centro de los testigos, como medio de determinar el punto final del secado, es un método útil y fiable, especialmente si no existe una exagerada dispersión en la humedad inicial y el material es homogéneo.
- 4.^a La temperatura de la madera al final del proceso de igualación debe ser del orden de 2 °C inferior a la alcanzada en la fase de secado, para de este modo disminuir el gradiente de humedad.

SUMMARY

Aptitude of different softwoods and hardwoods to drying with superheated steam. Drying end point determination

Drying with superheated steam is evaluated in lumber from different Spanish softwoods (*Pinus pinaster*, *radiata*, *sylvestris* and *nigra*) and hardwoods (*Eucalyptus globulus* and *Populus* sp.). Major problems with softwoods seems to be related with high resin content and encased knots. Problems with hardwoods drying are related with permeability, collapse and checking tendency.

The applicability of the determination of the internal wood temperature to decide the end point of drying is also evaluated.

KEY WORDS: Superheated steam drying

Drying

High temperature drying

End point drying

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALVAREZ NOVES H., FERNANDEZ-GOLFIN SECO J. I., 1992. Fundamentos teóricos del secado de la madera. Monografías INIA n.º 82, 193 pp.
- KAUMAN W. G., 1956. Equilibrium moisture content relations and drying control in superheated steam drying. Forest Prod. J. 6 (9): 328-332.
- KOCH P., 1972. Utilization of the southern pines. Vol. I. USDA Forest Service, Agriculture Handbook n.º 420, 326-328.
- KOLLMANN F. P., COTE W. A., 1968. Principles of wood science and technology. Vol. I, 460-463.
- MARTIN M., BASILICO C., PERRE P., SCHMIDT D., 1989. Upgrading of softwood quality using high temperature drying. A new optimal process. IUFRO International wood drying Symp. proceedings. July 23-28 1989, 131-137.
- NESTER M. R., PANOW S., 1983. Heat transfer along thermocouple wires inserted in timber. Queensland Dept. of Forestry Res. Note 38.
- PANOW S., NESTER M. R., 1984. Some moisture content/temperature/time relationships for individual timber specimens during high temperature drying. Queensland Dept. of Forestry Res. Note 39.
- PANOW S., NESTER M. R., 1985. Drying end point determination during high-temperature drying. Forest Prod. J. 35 (10): 51-55.