CONSIDERACIONES SOBRE EL SECADO A ALTA TEMPERATURA

ALVAREZ NOVES, H.
FERNANDEZ-GOLFIN SECO, J.I.
I.N.I.A. Dpto. Industrias Forestales

INTRODUCCION

Una de las últimas modificaciones que se han introducido en la tecnología del secado en cámara con aire climatizado, también llamado tradicional o convencional, ha sido la de incrementar la temperatura con el fin de reducir la duración del secado.

Los programas de secado de la madera aserrada por el método tradicional, recomiendan utilizar temperaturas comprendidas entre 40 y 70°C y como caso extremo 80-90°C sólo en la última fase de secado de algunas especies.

Desde hace 30 a 35 años, se sabe que algunas especies pueden ser secadas empleando temperaturas de 120°C, e incluso más, sin riesgo de sufrir daños.

El problema de la aplicación de altas temperaturas (>100°C) surge con el hecho de que cada especie y, aún dentro de ésta, cada grueso de tabla y tipo de sección, reacciona de manera diferente ante este procedimiento de secado, por lo que los avances habidos en este campo están basados en la experimentación práctica sobre cada especie, grueso y sección.

Las experiencias realizadas hasta el momento presente en diferentes países, demuestran que ciertas especies pueden ser secadas a alta temperatura de principio a fin, mientras que otras solamente la toleran al final de la operación.

Gran parte de los avances habidos en este procedimiento de secado se produjeron en Alemania. Así KOLLMANN (1961) y (1968), fue el primero en establecer que ciertas frondosas parcialmente presecadas a baja y media temperatura y algunas coníferas, desde el estado verde, pueden ser secadas por este procedimiento.

Pero la mayor demostración de la capacidad de este método se debe a KOCH (1972), quien trabajando con los pinos del Sur de Estados Unidos demostró que la duración del secado puede ser reducida desde las 80 ó 90 horas que normalmente se emplean con el método "tradicional", a 20 ó 24 horas, haciendo uso de una temperatura de 120°C.

Reducciones similares en la duración del secado, fueron obtenidas para el pino radiata de Australia y Nueva Zelanda, por WILLIANS y KININMONTH (1984), pero con la salvedad de que para obtener una buena calidad de secado era conveniente que los gruesos de las piezas no fueran superiores a 50 mm ni las secciones cuadradas. Estos resultados han sido confirmados posteriormente con los estudios del CTBA (1988) sobre pino marítimo, pino silvestre y picea y del INIA (1991), ALVAREZ NOVES, H (1992), y ALVAREZ NOVES, H. Y FERNANDEZ-GOLFIN, J.I. (1993), sobre diferentes coníferas y frondosas españolas.

El secado a alta temperatura es en este momento una realidad industrial. Actualmente ya no se cuestiona que este procedimiento de secado es el más rápido de entre todos los conocidos para secar coníferas permeables como el pino radiata de Australia, Nueva Zelanda, Chile y España, los pinos del Sur de Estados Unidos y el pino pinaster de Francia y España. La lista de especies que pueden ser secadas a temperaturas superiores a 100°C desde el estado verde, aumentan continuamente (pino silvestre, pino laricio, picea) e incluso el secado de maderas de frondosas es posible con ciertas limitaciones (chopo sin corazón negro o eucalipto por debajo del punto de saturación de las fibras).

Indudablemente, para lograr una buena calidad de secado se deben cuidar algunos aspectos relativos tanto al diseño de los secaderos (velocidad del aire a través de las pilas, anchura de las pilas y peso sobre las pilas) como al proceso de secado en sí (fase de calentamiento, punto final del secado, fases de igualación y acondicionamiento) que no siempre se respetan.

El secado a alta temperatura tiene un futuro prometedor pero con ciertas limitaciones en cuanto a especies a secar y calidad de secado a obtener: Actualmente son ya muchos los casos en los que se obtienen buena calidad, más económicos y en menor tiempo que con el procedimiento tradicional.

FUNDAMENTOS DEL PROCEDIMIENTO

De acuerdo con KOLLMANN y COTE (1968), se considera secado a alta temperatura, en sentido general, a aquél que se efectúa a una temperatura de bulbo seco superior a 100°C. Sin embargo, según cuál sea la temperatura del bulbo húmedo se pueden considerar dos casos:

1º

Si se mantiene inferior al punto de ebullición (<100°C), 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".

2º

Si se mantiene igual al punto de ebullición (100°C), lo que es indicativo de que el secado se efectúa en una atmósfera pura de vapor de agua, sin presencia de aire, el secado se le denomina "secado en vapor sobrecalentado".

El secado de la madera es, en todos los casos, un proceso consistente en la eliminación superficial de agua, a la vez que ésta migra desde el interior hacia el exterior de la madera.

Tanto si se trata de secado a alta temperatura propiamente dicho o de secado en vapor sobrecalentado, existen tres fases perfectamente diferenciadas:

Primera fase: En esta fase el agua libre se encuentra presente tanto en el interior como en el exterior de la pieza.

Si el contenido de humedad inicial de la madera es elevado, se puede admitir que la superficie está recubierta de una capa de agua. En estas circunstancias, el agua se evapora desde esta superficie como si desde una superficie de agua libre se tratara.

Es difícil estudiar la evaporación del agua desde la superficie de la madera como un fenómeno independiente, ya que no puede ser disociado en la práctica de la circulación interna del agua libre, que alimenta de forma contínua a la superficie.

A pesar de ello, esta fase inicial tiene en la práctica una duración muy corta. Esto es así, por cuanto el ritmo de la evaporación suele ser mayor que el del movimiento interno del agua libre. Aún con todo, durante los primeros momentos del secado, existe un sustancial flujo de agua libre desde el interior bajo la acción de la presión interior de las burbujas de aire que existen dentro de la madera, las cuales se dilatan con el calor y empujan el agua libre hacia el exterior.

Este proceso de evaporación superficial disminuye en intensidad al interiorizarse la línea húmeda

TABLA 1

HEH de la madera en función de las temperaturas seca y húmeda, a la presión atmosférica (*).

(*) El valor superior corresponde a la humedad relativa en esas condiciones y el inferior a la humedad de equilibrio (HEH).

Th	TEMPERATURA SECA										
	127	**124**	**121**	**118**	**115**	**113**	**110**	**107**	**104**	**102**	**100**
100	42	45	49	53	59	65	70	77	85	94	100
	3,1	3,4	3,8	4,2	5,0	5,8	6,9	8,7	11,3	15,5	19,5
99	40	43	47	51	56	61	67	74	82	90	98
	2,9	3,3	3,6	4,0	4,7	5,4	6,3	8,0	10,4	14,0	17,0
96	36	39	43	47	51	55	61	67	74	82	88
	2,7	3,0	3,4	3,8	4,2	4,7	5,5	6,6	8,3	10,7	13,0
93	32	36	39	42	46	51	55	62	67	74	79
	2,4	2,8	3,1	3,4	3,8	4,3	4,9	5,8	6,9	8,7	10,0
91	30	32	35	38	42	46	51	56	61	66	69
	2,2	2,5	2,8	3,1	3,5	3,9	4,5	5,1	5,9	7,0	7,6
88	26	28	30	34	37	40	44	48	52	58	61
	2,0	2,2	2,4	2,8	3,1	3,4	3,8	4,3	5,0	5,7	6,2
85	23	25	28	30	32	35	39	42	7	52	55
	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	3,4	3,7	4,3	5,0	5,4
82	20	22	24	27	29	31	35	38	42	47	50
	1,6	1,8	2,0	2,3	2,5	2,7	3,1	3,4	3,9	4,5	4,9
79	19	20	22	24	26	29	32	35	38	43	45
	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,2	3,5	4,0	4,4
77	17	18	20	22	24	26	28	31	34	38	40
	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,8	3,2	3,5	3,8
74	15	16	17	19	21	23	25	28	31	34	36
	1,2	1,3	1,4	1,6	1,9	2,1	2,3	2,6	2,9	3,3	3,5
71	13	14	16	17	19	21	23	25	27	30	32
	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,6	2,9	3,1

TABLA 2
DURACIÓN DEL SECADO CON VAPOR SOBRECALENTADO

Especie	**Espesor** (mm)	**Humedad de la Madera** Inicial %	Final %	**Tiempo total** (horas)
P. radiata	27	116	10,8	20
"	50	98	6,8	41
P. pinaster	**27**	**54**	**11**	**15**
"	**50**	**66**	**18**	**19**
P. silvestre	27	69	11,8	15
"	50	73	9,8	38
P. laricio	**27**	**85**	**9,6**	**20**
"	**50**	**81**	**11,8**	**37**
Chopo	27	90	11	15
"	50	96	13	27

o frente de evaporación de la madera.

La evaporación es un fenómeno que necesita calor y que resulta tanto más intenso conforme mayor sea el aporte calorífico del medio circundante a la superficie de evaporación.

En esta primera fase del secado, la transferencia calorífica a la superficie de la madera es el único factor que controla el proceso de secado, tanto a media como a alta temperatura. En esta fase las leyes que regulan el secado son las mismas para ambos casos.

Segunda fase: Esta fase comienza cuando ya no es posible admitir que la superficie exterior de la madera está rodeada de una capa de agua. En estas circunstancias se produce un fenómeno de evaporación interior, en el seno del cuerpo caracterizado por una menor superficie de evaporación y, por tanto, por una velocidad ligeramente inferior (Fig. 1).

A lo largo de esta segunda fase, el frente de evaporación interno o línea húmeda se va desplazando hacia el corazón de la pieza.

En esta línea húmeda se produce la evaporación del agua libre, la cual permanece a la temperatura de ebullición. El vapor generado se mueve en forma de flujo de masa bajo la acción de una ligera sobrepresión interna, originada por el gradiente de temperatura que existe dentro de la madera, desde la línea húmeda a la superficie, la cual permanece a temperatura igual a la del bulbo seco.

Esta es, entonces, la diferencia fundamental entre el mecanismo del secado a media y alta temperatura. En el secado a media temperatura, el movimiento de la humedad desde la línea húmeda a la superficie de la madera se realiza mediante el fenómeno de la difusión de humedad, mientras que en el secado a alta temperatura lo es por un flujo de vapor. En estas circunstancias, los poros de las punteaduras, que son ineficaces en la difusión del agua ligada, son muy adecuados para el paso del flujo de vapor. De ahí que el secado a alta temperatura sólo puede darse, en principio, en maderas muy permeables.

Mientras siga existiendo agua libre, el secado en la zona comprendida entre la línea húmeda y la superficie tendrá lugar bajo la acción de vapor de agua sobrecalentada (y por tanto con ausencia de aire). Por ello, su humedad de equilibrio evolucionará, en función de la temperatura de la madera, de acuerdo con la primera línea de la TABLA 1. En esta misma tabla se recogen los valores de la humedad de equilibrio higroscópico de la madera bajo la acción de una mezcla de vapor de agua y aire con una temperatura seca superior a la de ebullición del agua y diferentes valores de la temperatura húmeda.

Conforme la línea húmeda se interioriza en la madera, la difusión térmica (proceso de transporte de calor hasta la línea húmeda que permite, además de la evaporación, elevar la presión interior y conseguir un flujo de vapor), se convierte cada vez en factor más controlante del secado a alta temperatura. Por el contrario, en el secado a media temperatura es la difusión del agua ligada (a la presión atmosférica), la que se transforma en el factor controlante del secado. Por supuesto, en ambos casos debe existir una transferencia de calor adecuada desde el medio circundante, pero en el secado a alta temperatura la difusión térmica es controlante y en el secado a media temperatura es secundaria.

Es de señalar, además, que la difusión térmica es directamente proporcional al gradiente de temperatura entre la superficie de la madera y la línea húmeda, o lo que es igual, a la diferencia entre el valor del bulbo seco y la temperatura de ebullición del agua. Por tanto, el tiempo requerido para conseguir una reducción dada en el contenido de humedad es inversamente proporcional a esta diferencia de temperaturas.

La transición entre la primera y segunda fase no es abrupta, sino gradual, pudiendo comportar una cierta cantidad de tiempo, dependiendo de la permeabilidad de la madera.

Tercera fase: Cuando toda la madera se encuentra por debajo del punto de saturación de las fibras, el proceso, aunque diferente en su explicación teórica por la ausencia de agua libre, se supone que se rige por las mismas reglas enunciadas en la fase segunda, dada la alta activación energética que las moléculas de agua tienen como consecuencia de las altas temperaturas.

Es de señalar que la transición entre secado a media y a alta temperatura no es abrupta, a un valor dado de la temperatura, sino gradual.

Esta fase finaliza cuando la humedad media en el interior de la pieza de madera alcanza el valor deseado. En ese momento la pieza presenta un gradiente de humedad cuyos valores vienen dados por la TABLA 1.

CARACTERISTICAS DE LOS SECADEROS

El método de secado a alta temperatura, tal y como se emplea hoy día en la mayoría de las instalaciones, consiste en hacer pasar el aire procedente del exterior por un intercambiador de calor, donde es calentado hasta una temperatura de 105 a 130°C, impulsarlo a través de las pilas para, seguidamente, ser renovado parcialmente mediante las chimeneas (entra, pues, dentro del grupo primero o "secado a alta temperatura").

Como se ha visto en el punto anterior, la transferencia de calor es un factor de la mayor importancia en este método de secado. Por ello, es necesario utilizar velocidades de aire comprendidas entre 5 a 6 m/s. Por otra parte, la fuerte evaporación que se origina disminuye de forma notable la temperatura del aire a través de la pila, por lo que, para conseguir una adecuada homogeneidad en el secado, la anchura de las pilas no debe sobrepasar los 2 a 2,5 m.

La potencia instalada (calefacción) debe ser del orden de 30.000 Kcal/h por metro cúbico de capacidad útil del secadero.

Para reducir las deformaciones de secado, es conveniente hacer uso de pesos uniformemente

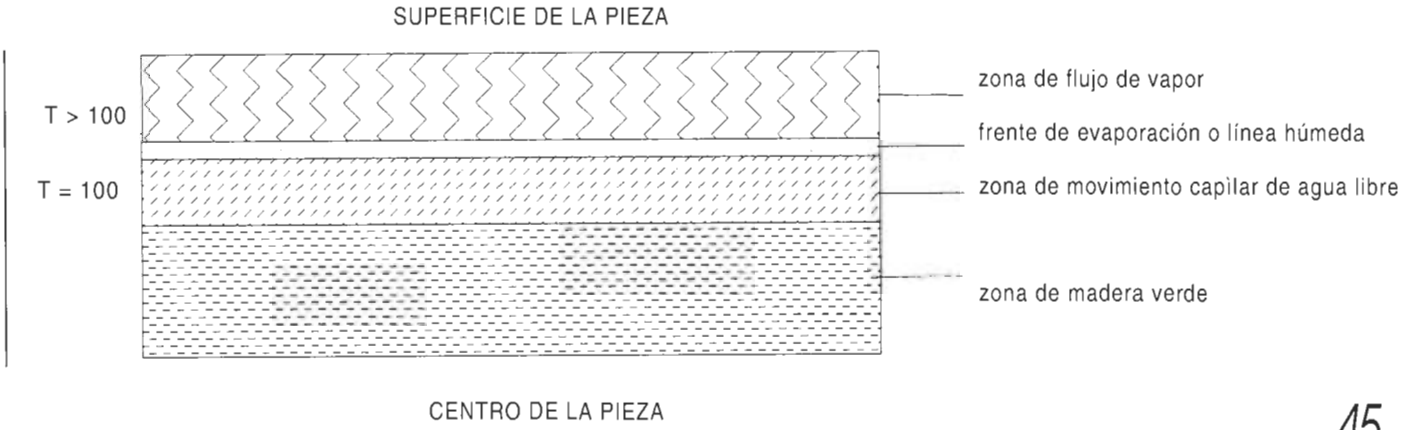

Fig. 1: representación esquemática del movimiento interno de vapor y agua líquida en el secado a alta temperatura de una pieza de madera.

repartidos en lo alto de la pila. El valor adecuado es de 1.000 Kg/m².

Los dos grandes problemas que presenta este procedimiento son la regulación y control del secadero y la determinación del punto final del secado. Respecto al primero, la determinación de la humedad relativa del aire de la cámara, es francamente difícil, tanto si se utilizan psicrómetros como aparatos de resistencia eléctrica, debido a su casi nula fiabilidad cuando trabajan a temperaturas superiores a 100°C y humedades de equilibrio higroscópico menores al 5%. Para soslayar este inconveniente y además para poder predecir más fácilmente cuando se ha alcanzado la humedad final deseada, en general, se recomienda mantener constante las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, normalmente 120°C y 70°C respectivamente, aunque ésta última puede ser variable, puesto que la humedad del aire no afecta mayormente la calidad del secado.

El punto final del secado se determina normalmente en función del tiempo transcurrido desde el inicio del proceso o cuando la caída de temperatura a través de la pila ha disminuido bajo un valor semiempérico.

Como fácilmente puede verse, esta determinación no es muy exacta, puesto que son varios los factores que influyen en la duración del secado, destacando, principalmente, la humedad inicial, humedad final y la permeabilidad de la madera.

Para evitar estos inconvenientes, que se dan en el secado a alta temperatura (en mezcla de aire y vapor), últimamente se han realizado pruebas en el INIA de secado en vapor sobrecalentado es decir, en una atmósfera pura de vapor de agua sin presencia de aire, a la presión atmosférica, con lo cual se consigue que la temperatura del bulbo húmedo se mantenga constante en el punto de ebullición (100°C) y, por consiguiente, conocer en todo momento la humedad relativa del ambiente de la cámara en función de la temperatura del bulbo seco y, lo más importante de todo, la determinación del punto final del secado por medio del conocimiento de la humedad de equilibrio higroscópico de la madera en la fase final del secado, en función de la temperatura del interior de la madera (medida por medio de termopares), utilizando la primera línea de la TABLA 1. Además, el procedimiento de vapor sobrecalentado ofrece mejor calidad de secado y requiere menos energía térmica (porque se evita el calentamiento de aire frío), que el de alta temperatura (aire y vapor).

Finalizado el secado es necesario acondicionar la madera con vapor saturado, para disminuir los gradientes de humedad y las tensiones en el interior de la madera. Esta operación es imprescindible

después del secado a alta temperatura (mezcla aire-vapor), pero no así para el secado con vapor sobrecalentado.

FACTORES CONDICIONANTES DE LA CALIDAD DEL SECADO

1º

Contenido en resina.- Los altos contenidos en resina son incompatibles con este método de secado, ya que al producirse su fluidificación, migra hacia la superficie, donde se cristaliza, produciéndose, además, una coloración oscura de la madera.

2º

Presencia de nudos muertos.- Estos nudos, sobre todo si van acompañados de resina, tienen tendencia a desprenderse, dejando un orificio manchado perimetralmente de color oscuro. Los nudos sanos, sin embargo, no sufren ninguna alteración.

3º

Humedad inicial.- El método resulta especialmente indicado para iniciar el secado desde el estado verde para las coníferas. Diferencias muy acusadas de la humedad inicial debidas a la heterogeneidad de la materia prima (albura y duramen o madera normal y madera juvenil), dan lugar a dispersiones en la humedad final.

4º

Espesor.- Como norma general, el secado presenta mayor calidad si el espesor es menor de 50 mm. Los espesores altos y, más aún, si las secciones son cuadradas o próximas a ellas, normalmente presentan grietas internas en los extremos de las piezas que se pueden extender hasta 20-25 cm de las testas.

5º

Permeabilidad.- La falta de una adecuada permeabilidad es causa suficiente para la aparición de bolsas de humedad, colapso y agrietamiento cuando se realiza el secado desde el estado verde. Cuando esta falta de permeabilidad es debida a anormalidades estructurales (corazón negro del chopo), la madera "normal" suele secar perfectamente, no ocurriendo lo mismo cuando el defecto está presente.

6º

Tendencia al colapso.- La tendencia de una madera a presentar colapso, imposibilita el uso de este método para su secado desde el estado verde.

CONCLUSIONES

1ª

El método de secado a alta temperatura (tanto en mezcla de aire-vapor como en vapor sobrecalentado) es apto para el secado rápido y económico de maderas de coníferas desde el estado verde, de bajo contenido de resina, sin nudos saltadizos, sin diferencias acusadas de humedad inicial y de secciones rectangulares con espesores inferiores a 50 mm.

2ª

Este método también es apto para frondosas permeables desde el estado verde y, en los demás casos, el secado se debe iniciar cuando la humedad está por debajo del punto de saturación de las fibras (30%).

3ª

La duración del secado es notablemente inferior a la del secado tradicional. La TABLA 2 recoge algunos valores indicativos de la duración de la operación por especies y espesores realizados en el INIA.

BIBLIOGRAFIA

ALVAREZ NOVES, H., 1992.- Secado de la madera aserrada de chopo. Proceedings de la 19ª Sesión de la Comisión Internacional del Alamo. Zaragoza. Vol. II. Cap. 14, pp. 319-348.

ALVAREZ NOVES, H.; FERNANDEZ-GOLFIN, J.I., 1993.- Aptitud de diferentes maderas de coníferas y frondosas al secado con vapor sobrecalentado. Determinación final del secado (pendiente de publicación).

CTBA (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement), 1988.-Sechage haute temperature sapin, épicea, pino sylvestre. 10 Avenue de Saint-Mandé,75012 París,107 pp.

I.N.I.A., 1991.- Propiedades y tecnología de la madera de pino radiata del País Vasco. Monografía INIA. nº 80. Madrid, 243 pp.

KOCH, P., 1972.- Utilization of the southern pines. USDA Detp. Agr. Forest Service Handbook nº 420. Vol. II Processing 1663 pp.

KOLLMANN, F.F.P., 1961.- High temperature drying. Research, application and experience in Germany. For Prod. J. 11 (11): 508-515.

KOLLMANN, F.F.P.; COTE, W., 1968.- Principles of wood science and technology. Vol. I. Solid Wood. Springer Verlag. Berlín, 592 pp.

WILLIAMS, D.H.; KININMONTH, J.A., 1984.- High-temperature kiln drying of radiata pine sawn timber. New Zeland Forest Service. FRI Bulletin nº 73. Rotorua, New Zealand, 16 pp.