

Descripción de un método preciso para el control del gradiente de humedad durante el secado de la madera

Por
Antonio Guindeo Casasús

El boletín "Forest Products Journal", en su número de julio/agosto, de 1984, estudia los aspectos fundamentales que inciden en el control continuo del secado de la madera. También se establece la disposición práctica necesaria para conseguir el referido control y muestra ejemplos de resultados obtenidos con equipos desarrollados con los criterios descritos. A continuación se resume el referido artículo, por ser de gran interés para todas las personas relacionadas con el secado de la madera, tanto a nivel industrial como de laboratorio

El estudio de la difusión del estado térmico y de la humedad de la madera, durante su secado, requiere un modelo práctico para evaluar estas variables de forma continua, lo que crea no pocos problemas, desde un punto de vista práctico.

Las técnicas existentes, en la actualidad, se estudian a continuación y se explica el diseño de una nueva punta de prueba para la medida, tanto de humedad como de temperatura del interior de la madera. Uno de los aspectos más modernos de este diseño es el excitar los electrodos de medida mediante una corriente alterna de baja frecuencia, en lugar de utilizar corriente continua, como es lo normal, hasta este desarrollo. La evaluación de resultados puede hacerse de forma sencilla, mediante un pequeño microordenador, para lo que está perfectamente estructurado el sistema, aunque tal aspecto es independiente del desarrollo de este artículo.

El proceso de secado de la madera en cámaras, puede influir de forma notable en algunas de sus propiedades básicas, modificándose de esta forma su calidad y utilidad. La estabilidad dimensional (asociada con la distribución de

tensiones internas) y la resistencia (especialmente el módulo de elasticidad) de una pieza de madera, se ven afectadas por la distribución de humedad y temperatura durante el secado. Por lo tanto, el conocimiento de la forma en que se realiza la difusión de ambos factores durante el secado es de gran importancia para la investigación y para la industria. El continuo crecimiento del costo de las materias primas y de la energía, hace que cada día adquiera más importancia este conocimiento.

La observación del cambio dinámico del contenido de gradiente de humedad y de la temperatura, hace preciso una medida continua de sus valores a distintas profundidades en la madera, el estudio posterior, una vez ordenados estos valores, da una medida de la respuesta dinámica de la madera en su secado.

Métodos generales de medida de humedad en la madera

Esta medida puede hacerse de una forma absoluta por relación de masa de agua a la de madera, o por métodos indirectos, basados en la variación de sus propiedades eléctricas, que puede ser la influencia de la humedad en su constante

dieléctrica o en sus propiedades de resistencia al paso de una corriente eléctrica. Estas técnicas son muy diferentes en cuanto a complejidad técnica y también en la precisión que proporcionan.

El método absoluto, basado en el cálculo de la relación entre la masa de agua que existe en una muestra y la masa de madera seca que existe en la misma muestra, se expresa:

$$CH = (Mh - Ms) / Ms \times 100$$

en donde,

CH = contenido de humedad (en %).

Mh = peso de la muestra a la humedad que se quiere determinar.

Ms = peso de la muestra seca en estufa.

La precisión de este método alcanza el $\pm 1\%$ cuando se realiza con cuidado, lo que es suficiente para la industria y la mayoría de los trabajos de laboratorio. Presenta la desventaja de su carácter "retrospectivo", pues la masa de madera seca se conoce solo al final del proceso, por lo que los valores del CH se calculan entonces de una forma retrospectiva, haciendo imposible la observación del fenómeno en tiempo real. También la determinación de esta masa seca es solo posible destruyendo la pieza de madera, una vez finalizado el ensayo.

La constante dieléctrica de la madera describe su habilidad para absorber y almacenar energía eléctrica. Cuando un potencial eléctrico se aplica a la madera, se produce una polarización de ésta, que se absorbe o disipa hasta que se neutraliza el campo eléctrico. La constante dieléctrica se expresa en términos de capacidad, mientras que el factor de pérdida se mide por la tangente del ángulo de pérdidas. Todas las experiencias realizadas al efecto, señalan que este último valor se encuentra muy influenciado por la temperatura y por el contenido de humedad de la madera, con una fuerte interacción entre ambos fenómenos, de forma que a efectos prácticos no es utilizable el sistema para la determinación de la humedad en la madera.

Por el contrario, la constante dieléctrica se ve influenciada muy intensamente por la humedad de la pieza y por su densidad, mientras que la temperatura tiene un efecto mucho menor, lo que permite la medida de la humedad de una pieza de madera, midiendo su constante dieléctrica, una vez compensados los efectos de la densidad y de la temperatura. No obstante, en la práctica se presentan problemas consistentes en irregularidades en el comportamiento de la superficie electrodo-madera, con la consecuencia de tener medidas erráticas. También la necesidad de conocer la

Disposición general de equipos y construcción de los electrodos

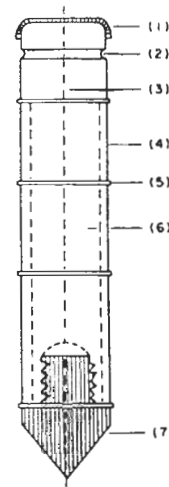
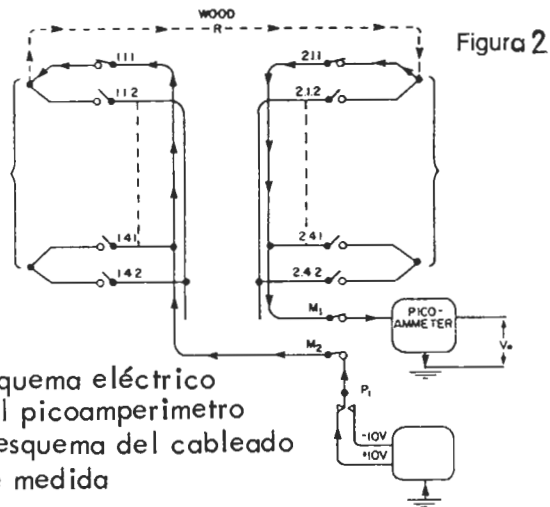
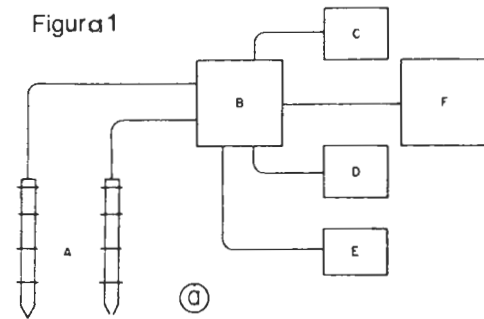


Figura 1



Esquema eléctrico del picoamperímetro y esquema del cableado de medida

densidad de la madera hace incómodo el procedimiento.

Para medir la humedad de la madera por el método resistivo, se aplica un voltaje conocido entre dos electrodos clavados en la madera; la determinación de la corriente que fluye entre ellos indica la resistencia que opone la madera al peso de la corriente eléctrica y, por lo tanto, su humedad. Alrededor de los electrodos ocurre un fenómeno de polarización que también se ve afectado por el contenido de humedad de la madera, su especie, temperatura, voltaje aplicado y geometría de los electrodos.

Siguiendo con la medida de la resistividad de la madera, cuando ésta se encuentra muy seca, se comporta como un dieléctrico y el desplazamiento de la carga eléctrica sobrepasa el efecto de la conducción, en términos puramente resistivos. La importancia de este efecto es que la polarización eléctrica que se produce se modifica por efecto de acciones mecánicas, por lo que se produce un efecto piezoeléctrico. Si se realiza una medida continua de la resistencia, como es el caso que nos ocupa, para comprobar de forma ininterrumpida la marcha del secado, estos fenómenos se incrementan, haciendo imposible la utilización del sistema resistivo tal como hemos descrito.

En la práctica, es más sencillo emplear corriente continua para medir la elevada resistencia que tiene la madera con un bajo contenido de humedad, pero como hemos indicado, en lecturas continuadas se forma una polarización importante y se producen depósitos por efecto de electrolisis, que incrementan la resistencia de contacto y ayudan a la formación de una fuerza electromotriz residual, que afecta desfavorablemente las medidas. El empleo de corriente alterna elimina estos problemas, aunque hace más fáciles las determinaciones de las pequeñas corrientes que se producen. Una solución de compromiso en los trabajos que estamos describiendo ha sido emplear corriente alterna de baja frecuencia, que a la vez que permite la lectura de la corriente circulante, por medio de un sencillo picoamperímetro, evita los efectos de polarización y depósito electrolítico en la superficie madera-electrodo.

El conocimiento de la humedad de la madera en función de su resistencia mediante higrómetros resistivos, se deriva de fórmulas empíricas, que se han comprobado por numerosas investigaciones. En el rango que en esta aplicación nos interesa, entre el 3 % y el 23 %, la aproximación más correcta es la fórmula de Siemens y Halle, desarrollada para especies europeas y calibrada a 15 °C:

$$\text{Log} (\text{Log} (R) - 4) = -0,0322 \text{ CH} + 1,009$$

en donde,

R = resistencia específica, en ohm-cm.

CH = contenido de humedad en la madera, en %.

La influencia que la temperatura tiene al efectuar estas medidas en la humedad de la madera también ha sido investigada en profundidad, lográndose la ecuación siguiente, que también es empírica:

$$\frac{dM}{dT} = \frac{-0,503 \text{ CH}_E}{B T^2}$$

en donde,

CH = contenido en humedad en la madera, en %.

T = temperatura absoluta, en °K.

E = energía de activación, en calorías por mol.

B = constante para cada madera y cada valor de temperatura.

Si no es necesaria una gran precisión, puede tomarse para dM/dT el valor 0,15 % del valor de la humedad de la madera y para cada grado centígrado.

También se ha comprobado que para tensiones continuas superiores a 10. el valor de la resistividad es independiente del voltaje aplicado, lo que puede también extenderse a corrientes alternas o pulsantes de signo contrario de baja frecuencia.

En cuanto a la geometría de los electrodos, los resultados pueden verse afectados por su diámetro y por su espaciamiento, siendo mucho menos crítica la utilización de electrodos de pequeño diámetro.

Existen otras fuentes de error que pueden desfigurar las medidas que se realicen, pero en concreto ahora nos referimos a los efectos causados por la enorme impedancia a la corriente eléctrica que tiene la madera con bajo contenido en humedad, lo cual obliga a que el aparato que realice la medida de la corriente que circula entre los electrodos sea del tipo electrómetro, con una impedancia de entrada ultraelevada, del orden de los billones de ohmio, con lo que el aislante de los cables que realizan la medida y de los diferentes componentes del aparato de medida tiene que ser de este mismo nivel, debiendo quedar las corrientes parásitas introducidas por este concepto por debajo de

$$\frac{1}{10^{11}} \text{ Amperios}$$

Esto se consigue situando anillos de guarda conectados a masa y colocados alrededor de las entradas de alta impedancia.

La realización de cargas mecánicas sobre los conductores o sus aislantes, producen por piezoelectricidad pequeñas corrientes, que por ser del orden de

$$\frac{1}{10^{12}} \text{ a } \frac{1}{10^{15}} \text{ Amperios}$$

no causan graves problemas. Las corrientes producidas por efecto de triboelectricidad (fricción producida por el flujo de electrones en la separación entre el elemento conductor y su aislante) es del orden de

$$\frac{1}{10^9} \text{ Amperios}$$

y se reduce considerablemente utilizando cables grafitados.

Otras corrientes que pueden causar error en estas medidas son las producidas por inducción, debida a compases magnéticos y eléctricos. Las corrientes de ruido del tipo Jhonson son del orden de

$$\frac{1}{10^{14}} \text{ Amperios}$$

e inherentes al material.

Equipo utilizado y método seguido

En resumen de lo anteriormente expuesto, puede deducirse que el único método práctico para el control continuo de la humedad de la madera durante el secado es el de medida de la resistencia entre dos electrodos clavados en la muestra. De acuerdo con esta conclusión, se ha desarrollado un método para comprobar de forma continua la variación de la humedad y de la temperatura de varios testigos colocados en una pila de secado en cámara. El equipo utilizado y los resultados conseguidos se exponen a continuación:

La disposición general de la instalación se representa en la figura 1 a), en la que los distintos elementos tienen el cometido siguiente: A) puntas de prueba que se introducen en los testigos. B) relé de conmutación que conecta las puntas de prueba con las distintas secciones del equipo (multiplexa las señales de los distintos pares de puntas de prueba con los circuitos de medida). C) amplificador de los termopares de medición de la temperatura. D) picoamperímetro de alta impedancia. E) excitación de corriente alterna de baja frecuencia. F) microordenador para un eventual tratamiento informático de la información recibida.

En la figura 1 b), se detalla la construcción de cada electrodo, que es el elemento más crítico del montaje, a fin de evitar la introducción de errores de lectura de los tipos definidos en la primera parte del trabajo. El significado de las distintas partes definidas en la figura es el siguiente: 1) cubierta metálica. 2) hendidura para el cable de conexión. 3) cavidad para conexión de conductores. 4) aislante de teflón. 5) anillo-electrodo de acero inoxidable

(forma parte de un termopar medidor de la temperatura, formado además por otro anillo interior de cobre y constatan. 6) cuerpo principal del electrodo. 7) elemento terminal.

En definitiva, cada par de puntas de prueba se utiliza para tomar 8 temperaturas a distintas profundidades (cuatro en cada punta) y cuatro medidas de humedad; de esta forma se conoce la variación de estos parámetros con el tiempo y su gradiente a distintas profundidades de la madera.

La determinación de la temperatura según las corrientes suministradas por cada termopar, no presenta problemas, salvo el de la amplificación de las pequeñas corrientes eléctricas que éstos proporcionan. En cuanto a la determinación de la resistencia eléctrica entre los cuatro pares de anillos de los electrodos, se hizo utilizando un voltaje alterno de 10 V y midiendo la corriente resultante; la aplicación directa de la Ley de Ohm nos permite conocer la resistencia ohmica de la madera existente entre los electrodos.

La enorme diferencia de resistividad de la madera en función de su humedad, hace que el instrumento empleado deba ser capaz de funcionar entre valores de 10^3 y 10^{10} ohmios. Como para tan elevados valores de resistencia la corriente que circula con una excitación de 10 V es extremadamente pequeña, no queda otra solución que emplear un picoamperímetro, cuyo circuito práctico se representa en la figura 2.

La medida de la resistividad de la madera se efectúa al final de cada ciclo de voltaje, pues como hemos indicado se aplica de forma alternada la tensión de medida, tanto en valor positivo como negativo, con lo que los errores quedan minimizados y únicamente presentan algún peligro residual de error la polarización residual, el calentamiento por efecto resistivo y los efectos de electrolisis.

Resultados obtenidos

La aplicación de la técnica anterior a un cargamento de madera de abeto Douglas en fase de secado en una cámara industrial clásica, sometida a condiciones higrotérmicas variables, y que correspondían a contenidos de humedad de equilibrio en la madera cada vez más bajos, funcionó de forma satisfactoria. Los testigos fueron dos, con un contenido de humedad del 43 % y del 75 %. La marcha del secado se comprobó periódicamente pesando los dos testigos. La diferencia de humedad inicial de ambos testigos se corresponde con la desigual marcha del secado durante las primeras 40 horas, en las que se consiguió una adecuada convergencia

(Continúa en la página 36).

...«Descripción de un método preciso para el control del gradiente de humedad...»

entre ambos. Las lecturas permitieron verificar un período de calentamiento de 4 horas, en el que el gradiente térmico en dirección al centro de la madera fue muy acusado. El punto crítico se alcanzó a las 30 horas, en donde se llegó al punto de saturación de la pared celular de la madera superficial; a partir de este momento se estableció el definitivo gradiente de humedad y de tensiones en el interior de la madera. El punto de saturación de la pared celular se clasificó en el centro de la pieza a las 50 horas, momento a partir del cual no existía agua libre en la estructura de la madera. La característica más importante del período siguiente fue el ritmo lento de secado, que se mantuvo hasta el final del proceso. El secado finalizó a las 72 horas, momento en el

que el gradiente de humedad y tensiones fue adecuadamente bajo.

Como conclusión, puede afirmarse que, con el proceso descrito, es posible controlar, de forma muy precisa, el secado industrial de la madera e identificar con exactitud todas las fases del mismo. Ello permite, al alcanzarse las etapas críticas, que son fundamentalmente el punto de saturación de la pared celular en la superficie de la madera y en el centro, modificar adecuadamente las condiciones higrotérmicas de la cámara. El objetivo final de todo este control es el secado de la madera en el tiempo más corto posible, sin que se produzca un gradiente de tensiones inaceptable.