

ISBN 10: 84-87381-37-5
ISBN 13: 978-84-87381-37-9
Depósito Legal: M-46544-2007
imprime Imprimex

Autores:

Juan Ignacio Fernández-Golfín Seco
golfin@inia.es
Marta Conde García
martaconde@inditecma.com
Dres. Ingenieros de Montes

Maquetación y diseño:

J. Enrique Peraza

Dibujos de elaboración propia:

María Conde García

Foto portada:

Entrada a secadero del Aserradero
Donohue. Québec (Canadá)

© Asociación de Investigación Técnica
de las Industrias de la Madera y Corcho.
AITIM

© Juan Ignacio Fernández-Golfín Seco

Manual técnico de secado de maderas

Presentación

Desde el momento en el que fue escrito el «Manual de secado de maderas» (1997) hasta la actualidad apenas ha transcurrido una década pero en ella se han producido notables cambios en el campo del secado de la madera.

Una tecnología que entonces estaba muy de moda en España, la del secado por bomba de calor, ha caído prácticamente en desuso, en parte por la retirada de las subvenciones públicas que entonces existían provenientes del Programa de Gestión de la demanda del Ministerio de Industria y en parte porque el único fabricante español de esta tecnología se ha retirado del mercado.

Otra tecnología que ha ido perdiendo adeptos, al menos en Europa, ha sido el secado a alta temperatura, por encima de los 100°C. El empleo de esta tecnología hoy en día está prácticamente circunscrito a los países productores de madera de pino radiata y a Estados Unidos.

Sin embargo, una tecnología que en aquél momento sólo era emergente, la del secado al vacío con vapor sobrecalentado, ha ido ganando adeptos y madurez, a la par que se han ido resolviendo los problemas de diseño propios de los primeros desarrollos tecnológicos.

Otro campo donde, por fin, ha habido notables desarrollos ha sido en el de la normalización de la calidad. Aunque todavía queda un amplio camino por recorrer, es de festejar que algunas de las recomendaciones del European Drying Group (EDG) hayan visto la luz en forma de normas europeas del Comité Europeo de Normalización (CEN).

El desarrollo de varias acciones COST, de la Unión Europea, que fomentan los encuentros y seminarios entre investigadores e industriales en el ámbito del secado de la madera ha permitido la divulgación de gran cantidad de trabajos sobre aspectos referidos al empleo de los sistemas eléctricos para la medida de la humedad de la madera, el empleo de pesos para el control de las deformaciones de la madera durante el secado, el diseño de sistemas probabilísticos para el control interno de la calidad del secado, etc.

En esta totalmente revisada edición del Manual de secado de maderas nos adaptamos a los cambios habidos e incorporamos los nuevos conocimientos adquiridos, eliminando parte de las profusas explicaciones de la anterior versión sobre el secado por bomba de calor, añadiendo otras nuevas sobre las mejores recomendaciones a seguir para la adecuada regulación y control del proceso o sobre las nuevas técnicas a seguir para el control de la calidad del secado.

El lector conocedor de la anterior versión rápidamente se dará cuenta que aunque la estructura del libro es similar a la anterior, sus contenidos están absolutamente revisados y, en muchos casos, totalmente cambiados.

Al igual que en su anterior edición, este «Manual de secado» tiene como principal objetivo facilitar y mejorar el conocimiento práctico de la operación de secado de la madera. Para facilitar su lectura hemos aglutinado todas las explicaciones teórico-prácticas en los capítulos 1 al 4, dejando las explicaciones más prácticas para los capítulos 5 al 7. Al final de cada capítulo se recogen todas las notas, estando éstas numeradas con un primer número correspondiente al ordinal entre las citas del capítulo y con un segundo, entre paréntesis, correspondiente al ordinal entre las citas del libro.

A veces a los investigadores se nos achaca una falta de conocimiento práctico sobre lo que investigamos y sobre todo que no sabemos transferir a la industria nuestros conocimientos. Esperamos con ilusión que con esta nueva edición, ahora denominada «Manual Técnico de Secado de Maderas», podamos superar esta crítica y que los industriales encuentren aquí las informaciones que necesitan para mejorar sus procesos.

Esperamos que este Manual, como el anterior, cumpla con el objetivo que nos hemos marcado de servir de guía y referencia a todo aquél que desee conocer los porqués y los cómo del secado de la madera.

Los autores

Agradecimientos

Son muchas las personas que con sus comentarios, sugerencias, preguntas y explicaciones nos han ayudado en el reto de renovar y actualizar los contenidos del «Manual de secado de maderas». El éxito que la versión precedente de este Manual ha tenido en el mundo empresarial y docente nos ha servido como acicate a la hora de abordar su actualización.

Por su elevado número no es posible reflejar aquí a todas las personas que, con sus preguntas y sugerencias, nos han ayudado a analizar los procesos y sus explicaciones bajo un renovado punto de vista. A todos ellos muchas gracias y nuestro expreso reconocimiento.

Las horas robadas al sueño, a la familia y a los amigos son también dignas de mención, pero esperamos que no nos pasen factura por ellas.

Tampoco queremos dejar de agradecer el apoyo de la editorial AITIM y de todo su personal, que con constancia y encomiable tesón han ido vendiendo uno a uno los ejemplares de la anterior edición.

A todos ellos, a los citados y a los no citados, nuestras más sinceras gracias.

¡Quieran los dioses que cada uno desempeñe el oficio que conoce!

Aristófanés

Índice

PARTE TEORICA DEL SECADO DE LA MADERA

CAPITULO 1

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA INFLUENCIA
DE LA ESTRUCTURA ANATOMICA DE LA MADERA
EN EL PROCESO DE SECADO

17

CAPITULO 2

PRINCIPALES PROPIEDADES QUE INFLUYEN EN
LA RELACION AGUA - MADERA

23

1.- Humedad de la madera

23

1.1.- Medida de la humedad

25

1.2.- Humedad de equilibrio higroscópico

27

1.3.- Humedad de uso

30

2.- Contracción

31

3.- Densidad

38

4.- Movimiento del agua en la madera

40

CAPITULO 3

PSICROMETRÍA DEL SECADO

43

1.- Temperatura

44

1.1.- Definición de temperatura y tipos de temperatura

44

1.2.- Medición de la temperatura

46

2.- Humedad relativa y humedad absoluta

48

2.1.- Definiciones y tipos de humedad

48

2.2.- Medida de la humedad relativa

52

3.- Velocidad del aire

56

4.- Presión atmosférica

58

CAPITULO 4

TECNOLOGIA DEL SECADO DE LA MADERA

59

1.- Secado al aire

59

1.1.- Descripción del método	59
1.2.- Enrastrelado y apilado	60
1.3.- Duración del secado	64
2.- Secado al aire seguido de secado en cámara	64
3.- Presecado industrial	65
3.1.- Descripción del método	65
3.2.- Características constructivas del equipo	66
4.- Secado en cámara mediante aire climatizado	67
4.1.- Características constructivas de las cámaras	68
4.2.- Características y diseño del sistema de circulación del aire interior	75
4.3.- Características de los procedimientos	78
4.3.1.- Secado tradicional a temperatura media	78
4.3.1.1.- Descripción del método	78
4.3.1.2.- Características constructivas del equipo	81
4.3.1.3.- Regulación del proceso	86
4.3.1.4.- Duración del secado	86
4.3.1.5.- Consumo energético	87
4.3.2.- Secado a alta temperatura	89
4.3.2.1.- Descripción del método	89
4.3.2.2.- Factores condicionantes de la calidad del secado	91
4.3.2.3.- Duración del secado	93
4.3.2.4.- Consumo energético	93
4.3.3.- Secado con bomba de calor	93
4.3.3.1.- Descripción del método	94
5.- Secado al vacío	97
5.1.- Fundamento teórico del método	97
5.2.- Características constructivas de los secaderos	99
5.3.- Características de los distintos procedimientos	100
5.3.1.- Secado al vacío discontinuo	100

5.3.1.1.- Descripción del método	100
5.3.1.2.- Regulación del proceso	100
5.3.2.- Secado al vacío continuo con empleo de placas calefactoras	101
5.3.2.1.- Descripción del método	102
5.3.2.2.- Regulación del proceso	102
5.3.3.- Secado al vacío continuo con vapor sobrecalentado	104
5.3.3.1.- Descripción del método	104
5.3.3.2.- Regulación del proceso	104
5.4.- Consumo energético en el secado al vacío	106
5.5.- Ventajas y desventajas del método de secado al vacío	107
6.- Secado por radiofrecuencia	107
6.1.- Método de ebullición	108
6.2.- Método del gradiente	108
7.- Técnicas relacionadas con el secado	109
7.1.- Estufado de la madera verde	109
7.1.1.- Descripción del método	109
7.1.2.- Características constructivas del equipo	111
7.1.3.- Consumo energético	112
7.2.- Esterilizado de la madera atacada	112
7.3.- Almacenamiento de la madera seca	114

PARTE PRÁCTICA DEL SECADO DE LA MADERA

CAPITULO 5	
CONDUCCION PRÁCTICA DEL SECADO TRADICIONAL EN CÁMARA	117
1.- Operaciones previas al secado	118
1.1.- Inspección de la carga de madera	118
1.2.- Inspección de los sistemas de control	120
1.3.- Inspección de los sistemas y componentes del secado	121

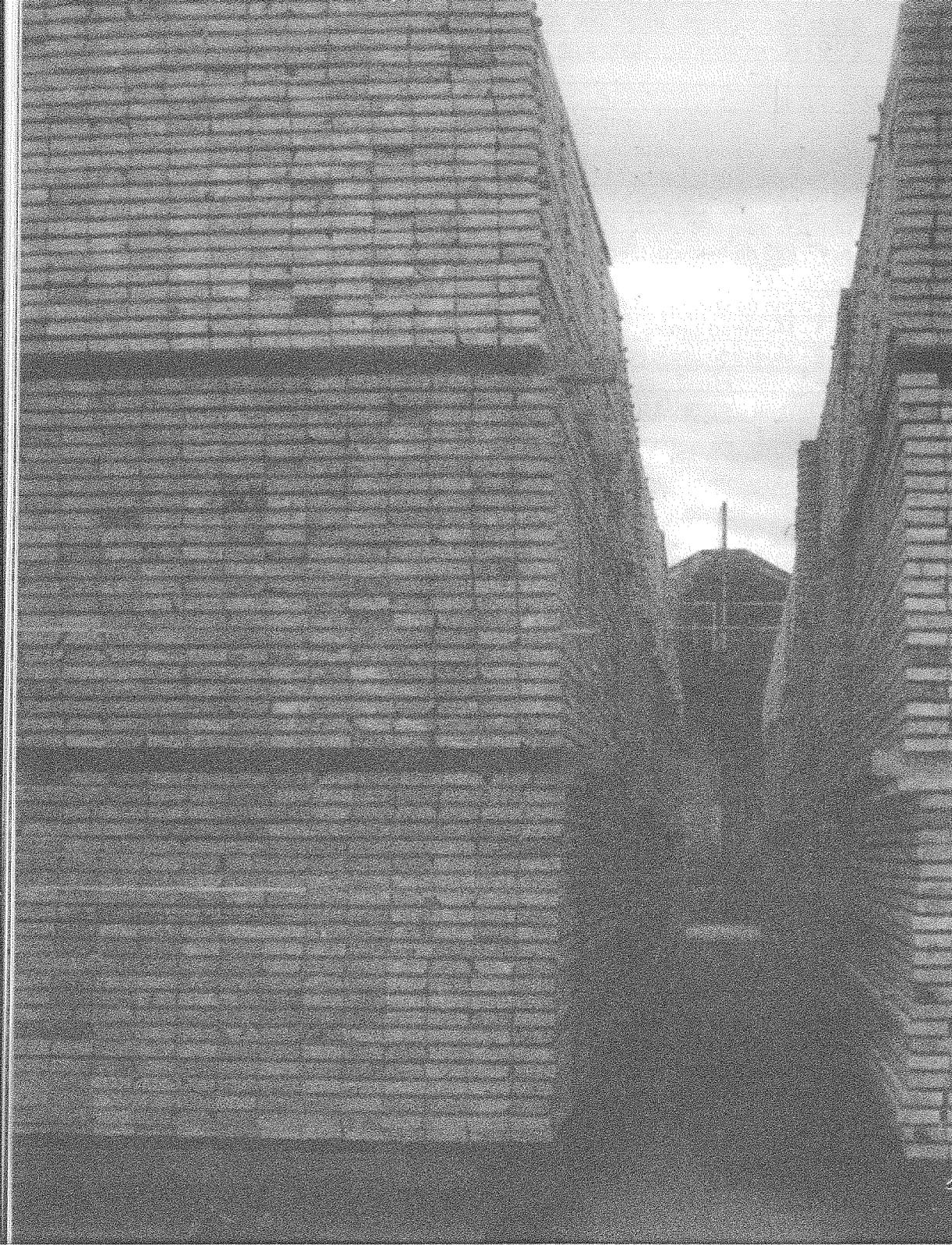
2.- Apilado y carga de del secadero	122
3.- Control y regulación del proceso de secado	128
3.1.- Control de la evaluación de la humedad de la madera	128
3.2.- Control de las condiciones climáticas dentro del secadero	131
3.3.- Sistemas de regulación de las condiciones de secado	132
3.3.1.- Regulación semi-automática	132
3.3.2.- Regulación automática	133
3.4.- Las fases del proceso de secado	136
3.4.1.- Fase de elevación inicial de la temperatura	137
3.4.2.- Fase de precalentamiento de la madera	138
3.4.3.- Fase de secado propiamente dicha	140
3.4.4.- Tratamientos complementarios	143
3.4.4.1.- Igualación y acondicionado	144
3.4.4.2.- Equilibrado	146
3.4.4.3.- Recomendaciones CIFOR-INIA para el equilibrado	147
3.4.5.- Fase de reacondicionado	150
3.4.6.- Fase de enfriamiento	151
3.5.- Cuidado de la madera seca	152
3.6.- Programas de secado	152
3.6.1.- Ejemplos	157
3.6.2.- Modificaciones de los programas de secado	158
3.6.2.1.- Modificaciones previas al secado	158
3.6.2.2.- Modificaciones durante el secado	163
3.7.-La duración del secado	166
Anexo: Programas de secado	169

CAPITULO 6

DEFINICION Y EVALUACION DE LA CALIDAD DEL SECADO DE LA MADERA ASERRADA

	185
1.- Calidad de madera frente a calidad de secado	187
2.- Conceptos a considerar en la evaluación de la calidad del secado	188
2.1.- Humedad de la madera, humedad media y gradiente de humedad	190
2.2.- Tensionado de la madera	193
2.3.- Agrietamiento y rajado	196

2.3.1.- Agrietamiento específico de la madera	197
2.3.2.- Agrietamiento debido a un mal proceso de secado	200
2.4.- Colapso	205
2.5.- Cambios de color, manchas	207
2.6.- Deformaciones naturales de la madera y deformaciones causadas por incorrecto enrastrelado	208
3.- Criterios para la evaluación de la conformidad con la calidad de un lote de madera aserrada	209
3.1.- Antecedentes	209
3.2.- Forma de efectuar el muestreo	211
3.2.1.- Muestreo simple	212
3.2.2.- Muestreo doble (o a dos pasadas)	214
4.- Formas de mejorar la calidad del secado	218
4.1.- Formas de limitar los defectos del secado	218
4.2.- Metodología general para la obtención de un secado de calidad	218
CAPITULO 7	
PRECIO DE COSTE Y MODOS DE FACTURACION DEL SECADO	223
1.- Determinación del precio de coste de la operación de secado	223
2.- Modos de facturación del secado	228
2.1.- Porcentajes de pérdida de volumen por merma	229
2.2.- Porcentaje de pérdidas de volumen por depreciación	229
BIBLIOGRAFIA DE INTERES	231
DICCIONARIO DE TERMINOS DE SECADO	232



Capítulo 1

Consideraciones generales sobre la influencia de la estructura anatómica de la madera en el proceso de secado

Existe una gran diferencia entre la cantidad de agua contenida en el árbol vivo y la que debe poseer la madera para su correcta puesta en servicio. Por esta razón, se hace completamente necesaria la eliminación del agua sobrante antes de proceder a la fabricación de los productos finales (mobiliario, estructuras, suelos, elementos de carpintería, etc.). La eliminación previa de este agua excedentaria es necesaria por las siguientes razones:

- Para reducir los cambios dimensionales de la madera en servicio
- Para evitar las deformaciones (abarquillado, alabeo, curvados) que aparecen en la madera como consecuencia de su secado.
- Para facilitar la mecanización
- Para eliminar el riesgo de ataque por hongos.
- Para reducir el peso en el transporte¹.

Secar quiere decir eliminar el agua que está en exceso. Por tanto secar consistirá en reducir la humedad de la madera hasta un valor compatible con el uso previsto. Para conseguir este fin lo más rápidamente posible son necesarias las tres acciones siguientes:

- Suministrar el calor necesario para producir la evaporación del agua.
- Provocar el desplazamiento de la humedad desde el interior de la pieza hasta la superficie.
- Arrastrar de la superficie de la pieza el vapor de agua resultante de la evaporación.

De estas tres acciones, que serán tratadas con más detalle en los siguientes capítulos, la segunda es la más compleja y la que más condiciona el proceso de secado, estando totalmente influenciada por la estructura anatómica de la madera.

No es objeto de la presente publicación analizar la estructura anatómica de la madera y la diferencia que se observa al respecto entre las diferentes especies. Para los lectores interesados, nos remitimos a las numerosas publicaciones especializadas sobre el tema y a lo escrito por estos mismos autores en la publicación «Fundamentos teóricos del secado de la madera». No obstante, seguidamente y en el primer apartado del capítulo segundo se dan unas nociones de hasta qué punto puede influir la estructura anatómica de la madera en el proceso del secado.

La práctica demuestra que las numerosas diferencias anatómicas existentes entre las distintas especies de madera, tienen una clara repercusión sobre el flujo de humedad por su interior.

Dentro del flujo de humedad que se pone en movimiento en el interior de la madera como consecuencia del secado, hay que distinguir entre el flujo de agua libre, el de la difusión del vapor de agua y del agua ligada (ver Capítulo 2º). Otro flujo que se da, aunque sólo circunscrito al caso en que se haga uso de temperaturas por encima de la de ebullición del agua, es el flujo de masa de agua líquida y vapor de agua impulsado por una sobrepresión interior (generada por la ebullición interna del agua libre).

Respecto del movimiento del agua libre, las punteaduras de paso (comunicaciones microscópicas entre células adyacentes) y, más en concreto, el tamaño y el número de los poros de sus membranas (a modo de tela que poseen las punteaduras) que cierran el orificio son las que definen la mayor o menor facilidad del flujo.

Por otra parte, dado que las punteaduras de paso se disponen mayoritariamente en las caras radiales de los elementos longitudinales (fibras, traqueidas, etc.), la circulación interna será más acusada en la dirección tangencial que en la radial. Por otra parte, es también necesario tomar en consideración que la circulación radial viene especialmente favorecida por la presencia de los radios leñosos y, en especial, por la presencia en estos últimos de los canales resiníferos radiales (coníferas), lo que puede hacer que la permeabilidad radial resulte, en ocasiones, más acusada que la tangencial. A este respecto no existe una clara opinión entre los expertos ya que en función de la estructura anatómica de la madera pueden darse resultados completamente distintos.

El flujo longitudinal de agua libre está favorecido por el número, tamaño y continuidad de los elementos anatómicos longitudinales. En este sentido será mayor en las frondosas y dentro de ellas en las de anillo difuso (chopo, abedul, haya) que en las de anillo poroso (roble, castaño, fresno).

En la difusión del vapor de agua, por contra, la influencia de las punteaduras no resulta tan decisiva, ya que si bien en el flujo de líquidos, los poros de las membranas de las punteaduras resultan de gran eficacia, éstos no presentan análoga eficacia en el flujo del vapor de agua, al ser para esta función excesivamente pequeños en tamaño. Es por esto por lo que la difusión del vapor de agua, junto con la del agua ligada en la madera, se realiza mayoritariamente a través y por el interior de la estructura de la pared celular.

Por consiguiente, la densidad de la madera juega un papel importante en el proceso de la difusión. A medida que aumenta la densidad, las paredes celulares resultan más gruesas y los lúmenes más reducidos, por lo que la humedad, sea en forma de vapor o de agua ligada, circulará más dificultosamente por el interior de esta estructura.

En las coníferas, los árboles de crecimiento más rápido presentan anillos de crecimiento más anchos, por lo que, el secado será más rápido y fácil, teniendo en cuenta que la anchura de la madera de verano, dentro del anillo, resulta prácticamente constante y la cantidad de madera de primavera es mayor.

En las frondosas de anillo poroso (roble, castaño, fresno) el fenómeno es justamente el contrario ya que es el espesor de la madera formada en primavera el que permanece constante, motivo por lo cual un mayor crecimiento anual se traduce en una menor permeabilidad al haber mayor cantidad de madera de verano. Por ello, la madera de frondosas de anillo poroso (roble, fresno, olmo) procedente de árboles de crecimiento más rápido resulta más pesada y difícil de secar que aquella otra que procede de árboles de crecimiento más lento.

Finalmente, en las maderas de poro difuso (eucalipto, haya, chopo, etc.) el efecto del tamaño del anillo no será tan acusado dado que presentan una estructura más homogénea en toda su anchura.

En general hay que decir que todas las variables (genéticas, selvícolas, de crecimiento, etc.) que incidan sobre el crecimiento del árbol lo harán sobre la estructura anatómica de la madera y, por tanto, sobre el ritmo del secado. Su mayor o menor influencia dependerá de diversos factores fisiológicos, motivo por lo cual no es posible establecer normas fijas sino pautas de comportamiento.

De todo lo anterior se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Que el secado es más rápido en las maderas ligeras que en las pesadas.
- Que las coníferas (pinos, abetos, alerces, etc.) de crecimiento rápido secan más rápidamente que las de crecimiento lento (incluso para la misma especie).
- Que las frondosas de anillo poroso (roble, castaño, fresno, olmo) se comportan de forma opuesta al patrón antes citado para las coníferas, ya que su velocidad de secado es tanto mayor conforme menor sea el grosor del anillo de crecimiento (menor densidad).
- Que las frondosas, especialmente las de anillo poroso, secan longitudinalmente (por las testas) más rápidamente que las coníferas (mayor riesgo, por tanto, de fendas de testa). En general la permeabilidad longitudinal de la madera puede llegar a ser varios centenares de veces superior que la transversal. Por otra parte, la permeabilidad tangencial suele ser ligeramente inferior a la radial (por efecto de los radios leñosos), si bien esta última pauta no es siempre así.
- Que el tipo de aserrado (tangencial, radial, canteado o sin canteo) tiene, sin duda, también efecto sobre la velocidad del secado, si bien este efecto no sigue una pauta fija, dependiendo de la especie de madera de que se trate. En general las tablas de aserrado tangencial parecen secar más rápidamente que las de aserrado radial.
- Que el duramen, pese a tener menor contenido de humedad (40-50%) seca más lentamente que la albura (100-200% de humedad), ya que en muchos casos las punteaduras quedan bloqueadas, bien por la aspiración del torus, bien por la

- acumulación de sustancias impregnantes sobre el margo.
- Que el secado de la madera juvenil, cuando hace acto de presencia, es dificultoso, motivo por lo cual cuando en una pieza de madera hace acto de presencia y su espesor es superior a 30 mm habrá que llevar a cabo prácticas especiales tendentes a evitar la dispersión de humedad en su seno (acondicionado, apilado en macizo tras secado, etc.).
- Que cuando en una madera hacen acto de presencia los tyllos (oclusiones vesiculares presentes fundamentalmente en los vasos, rara vez en las fibras), lo cual puede ocurrir por causas genéticas (Eucalipto), por ataques de hongos y bacterias, por heridas en el tronco o por cualquier otra causa, el secado es más lento y difícil ya que el movimiento del agua líquida se encuentra frenado, si no interrumpido, debiendo salir el agua de la madera exclusivamente por difusión.
- Que la madera rehumedecida tras un tratamiento con sales o con productos hidrodispersables seca más lentamente que la madera verde. Este comportamiento suele ser debido a la aspiración del toro de las punteaduras (coníferas) o al depósito de sustancias impermeables sobre el margo. Esto explica también porqué la madera rehumedecida posee una permeabilidad menor que la madera verde.

En las figuras que aparecen a continuación se detallan de forma sencilla los siguientes aspectos de la madera: la sección transversal de un tronco (figura 1.1.), la estructura anatómica de la madera (figura 1.2), las distintas formas de la presencia del agua en el interior de la madera (madera verde, madera con una humedad inferior al 30 % y madera anhidra o al 0%) (Figura 1.3), y esquema del movimiento del agua líquida y del vapor de agua dentro de la madera (figura 1.4).

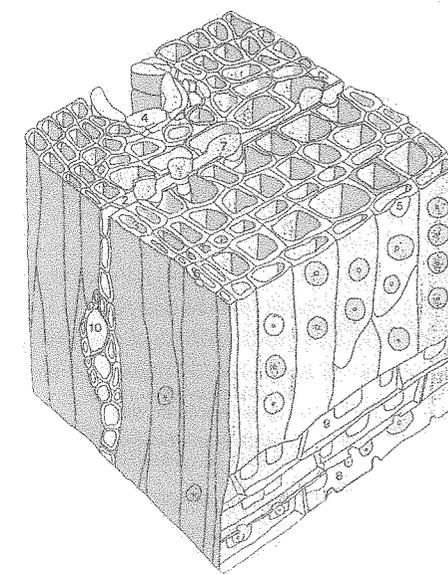


Figura 1.2. Estructura anatómica de la madera (Coníferas)

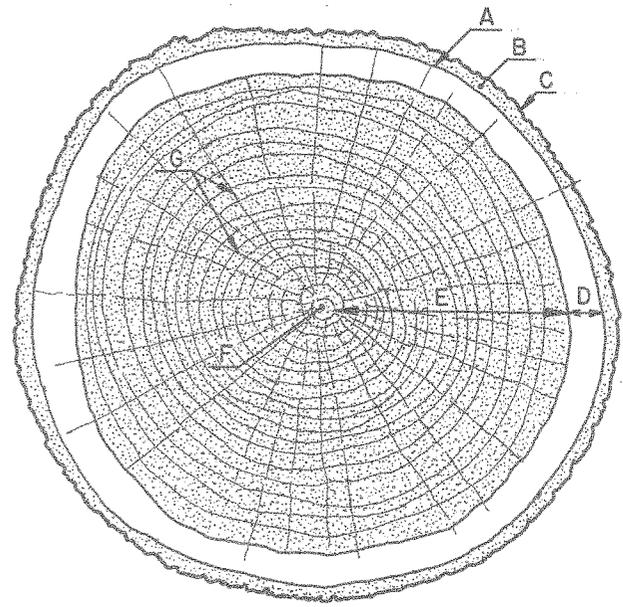


Figura 1.1. Estructura anatómica de la madera. A. Cambium, B. Corteza interna, C. Corteza externa o muerta, D. Albura, E. Duramen, F. Médula, G. Radios leñosos

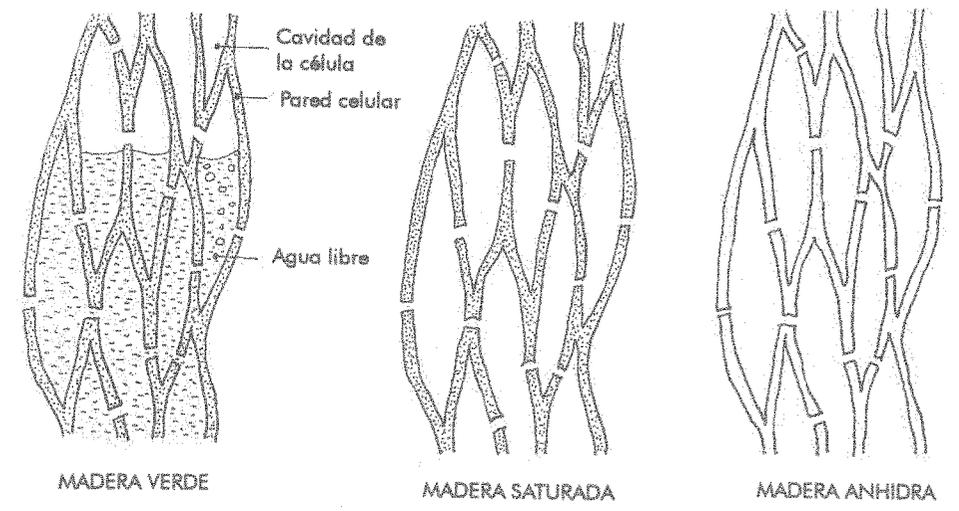


Figura 1.3. Distintas formas de presentación del agua en la madera (madera verde, madera con humedad del 30%, madera anhidra)

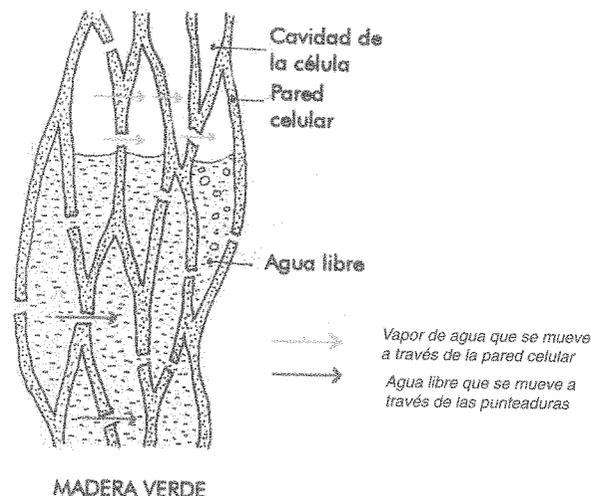


Figura 1.4. Esquema del movimiento del agua líquida y del vapor de agua dentro de la madera

Notas

¹ Un camión de tres ejes puede cargar del orden de 30-33 toneladas. Esta masa correspondería a 36 m³ de madera de pino radiata al 100% de humedad, a 48 m³ de madera de la misma especie al 50% o a 60 m³ de madera seca al 12%. Es por ello por lo que la repercusión del transporte por m³ de madera baja notablemente conforme lo hace su contenido de humedad. Este razonamiento tiene el límite del volumen de la carga, ya que por volumen difícilmente podría sobrepasar los 45-48 m³. Análogamente, para la madera de roble el citado camión cargaría 38,5 m³ de madera al 50% de humedad, 44 m³ de madera al 25% y 47 m³ al 12%.

Capítulo 2

Principales propiedades que influyen en la relación agua-madera

En este capítulo se explican las propiedades de la madera más relacionadas con el secado, como son la humedad, la contracción y la densidad. Asimismo en el último apartado se explica el movimiento del agua en la madera.

1.- HUMEDAD DE LA MADERA

La humedad de la madera o contenido de humedad de la madera se define como el cociente entre la masa de agua presente y la masa anhidra de la madera, expresado en tanto por ciento.

$$h(\%) = \frac{M_h - M_o}{M_o} \times 100$$

h : Humedad de la madera (%)

M_h : Masa de la madera húmeda

M_o : Masa de la madera totalmente seca (anhidra)

La humedad de la madera en estado completamente verde presenta grandes variaciones de unas especies a otras y también según la posición dentro del árbol y la época de corta. Por ejemplo, en la albura (véase figura 1.1.) de las coníferas es habitual considerar valores del 150 al 160%, del 200% en el chopo y pino radiata y del 80 al 90% en la mayoría de las frondosas europeas. El duramen contiene notablemente menos humedad, considerándose valores máximos del 70 al 80%.

Para la madera su humedad es la propiedad más importante ya que influye sobre todas las demás propiedades, sean éstas físicas, mecánicas, tecnológicas o de durabilidad y estabilidad dimensional. La gran mayoría de las reclamaciones que tiene la madera en obra o servicio está relacionada con valores inadecuados en su contenido de humedad.

En el secado, la humedad de la madera y sus características (valor medio, dispersión) está relacionada con:

- La duración del secado
- El consumo energético específico (kWh/kg de agua evaporada)
- La necesidad de llevar a cabo procesos de vaporizado previos
- La dispersión final de humedad en la madera seca
- La presencia de colapso

El agua está presente en la madera como vapor de agua, como agua libre y como agua ligada.

- el agua libre, está presente en la madera de forma líquida relleno el interior de las cavidades celulares (lúmenes). Está presente cuando la madera tiene un contenido de humedad superior al Punto de Saturación de las Fibras (que como media se considera un valor del 30%), pero desaparece cuando está por debajo de este umbral.

- el agua ligada está fijada en las paredes celulares mediante fuerzas de gran intensidad de tipo físico y químico.

a. agua libre

El proceso de secado elimina en primer lugar todo el agua libre y a continuación empieza a eliminar una parte del agua ligada. La eliminación del agua libre superficial se realiza rápidamente y el consumo específico (kWh/l) de energía que requiere es relativamente bajo, ya que el agua libre está muy débilmente ligada a la madera. Una vez perdido este agua superficial el proceso se va interiorizando adentrándose en el interior de la estructura de la madera. Cuando esto ocurre es cuando realmente comienza el proceso del secado de la madera.

Durante el secado, la madera va perdiendo su agua libre interior hasta que llega a un punto, denominado punto de saturación de las fibras PSF (que como media para todas las especies se suele considerar el 30%), en el que ya no tiene más agua libre que perder. Durante esta fase (desde verde hasta el PSF) no se producen cambios dimensionales en la madera, ya que se ha eliminado el agua que se encontraba en el interior del lumen de las células pero todavía no la contenida en el interior de la pared celular.

b.- agua ligada

La eliminación del agua ligada (la contenida en el interior de la pared celular) es más lenta y según el secado avanza, tanto el tiempo como la cantidad de energía que es necesario aportar aumentan, ya que el agua remanente está cada vez más ligada a las paredes celulares de las células de la madera. Durante esta fase la pérdida de humedad conlleva cambios dimensionales (mermas o contracciones).

La terminología utilizada para referirse a los distintos grados de humedad de la madera es la reflejada en la tabla adjunta:

Estado de la madera	Humedad(%)	Comentarios
Verde	>30	En pie o recién cortada
Saturada (punto saturación fibras)	30	Expuesta al aire saturado
Semi-seca	23-30	Presecada u oreada
Comercialmente seca (Shipping-dry)	18-22	Lista para el transporte. Humedad de equilibrio en transporte marítimo
Seca al aire	13-17	Seca al aire (humedad límite en secado al aire)
Seca en cámara	<13	Secada artificialmente (en cámara o secadero)
Anhidra	0	Secada en estufa (Laboratorio)

En el apartado 4, así como en el 3.4 del Capítulo 5, se explica más profusamente cómo tiene lugar el proceso de extracción del agua de la madera.

1.1.- Medida de la humedad

Los métodos más empleados para medir la humedad de la madera son el de pesadas (método de estufa) y el de xilohigrómetro. Ambos métodos se encuentran actualmente perfectamente descritos, de acuerdo con lo establecido en las normas (europeas) UNE-EN 13183-1, 2 y 3.

- Por pesadas (método de estufa)

Este método está descrito en la norma UNE-EN 13183-1. Se trata de un método lento y destructivo pero muy exacto, que consiste en extraer una muestra de madera representativa (suficientemente alejada de bordes, testas y sin defectos significativos como nudos o bolsas de resina) de la pieza a la que se le quiere calcular la humedad. Extraída la muestra es pesada en una balanza, determinándose de esta forma su masa húmeda (M_h). Posteriormente la muestra es introducida en una estufa a $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ hasta que alcanza una masa constante (normalmente en 24-48 horas, según tamaño de probeta), momento en el que se vuelve a pesar determinando su masa anhidra (M_0). El valor de la humedad de la madera debe ser calculado aplicando la expresión siguiente:

$$h(\%) = \frac{M_h - M_0}{M_0} \times 100$$

- Mediante xilohigrómetro

Según cual sea el tipo de xilohigrómetro empleado (de resistencia o de capacitancia) este método está descrito en las normas UNE-EN 13183-2 (xilohigrómetro de resistencia) y UNE-EN 13183-3 (xilohigrómetro de capacitancia). Ambos son

métodos instantáneos, no destructivos y menos exactos que el anterior (de estufa), pero de precisión suficiente para la industria en el intervalo 7-27%. El método de resistencia es el más extendido, siendo además el habitualmente empleado para monitorizar a distancia la evolución de la humedad de la madera durante el secado industrial.

Aún cuando la precisión de su medida varía en función de la especie considerada, de la calidad y tipo del aparato, de la habilidad en su empleo y del estado de calibración, en un estudio llevado a cabo a nivel europeo se pudieron establecer los siguientes valores:

- Xilohigrómetros de resistencia: entre $\pm 1,5\%$ y $\pm 2,5\%$
- Xilohigrómetros de capacitancia: entre $\pm 2,5\%$ y $\pm 4,0\%$

Los valores anteriores corresponden a los establecidos en laboratorio o con un elevado grado de experiencia en el manejo de los aparatos, ya que a nivel industrial estos valores ascenderían a los siguientes:

- Xilohigrómetros de resistencia: entre $\pm 2,0\%$ y $\pm 5,0\%$
- Xilohigrómetros de capacitancia: entre $\pm 3,0\%$ y $\pm 5,0\%$

En los intervalos anteriores el valor menor podría ser aplicado para medidas en maderas con contenido de humedad inferior al 12% y el valor mayor para medidas tomadas por encima de dicho umbral de humedad.

En el caso de los xilohigrómetros de resistencia, su funcionamiento se basa en la relación lineal que existe en la madera entre su humedad y el logaritmo de la resistencia eléctrica al paso de una corriente. Esta condición de linealidad sólo se cumple en el intervalo entre el 7% y el 27%, motivo por lo cual estos aparatos no son aptos ni para el control de la madera excesivamente húmeda ni excesivamente seca. Por debajo del 6% la resistencia eléctrica crece tan rápidamente que es virtualmente imposible medirla usando un ohmímetro. Por encima del 27% las variaciones de la resistencia son muy reducidas, motivo por lo cual el error crece (desde $\pm 5\%$ a $\pm 20\%$). Esto último significa que la medida del contenido de humedad por encima del 60% no es fiable. Sin embargo, cuando se utiliza esta técnica para monitorizar el descenso de humedad de la madera en el proceso de secado, conforme este progresa se observa que las medidas (aunque no sean fiables en términos absolutos) exhiben una tendencia decreciente, motivo por lo cual esta técnica es empleada en la práctica incluso para decidir sobre el paso entre etapas del secado aunque la madera esté incluso verde. En el secado se considera que las medidas empiezan a tener suficiente fiabilidad por debajo del 45%.

Cuando se emplean aparatos portátiles para hacer medidas puntuales se puede considerar que en el intervalo de humedad que va entre el 27% y el 40% algunos aparatos permiten obtener medidas no exactas pero sí orientativas.

La medida en estos aparatos se efectúa clavando los dos electrodos, normalmente en dirección paralela a la fibra¹, hasta una profundidad de 1/3 del espesor de la pieza, si se quiere conocer el valor medio, o de 1/2 si se quiere determinar el valor máximo. El aparato suele llevar diversos mecanismos para la corrección de la medida según sea la especie y la temperatura.

El principio de los xilohigrómetros de capacitancia es totalmente distinto al descrito anteriormente para los de resistencia, ya que miden basándose en la variación de ciertas constantes dieléctricas de la madera con su contenido de humedad.

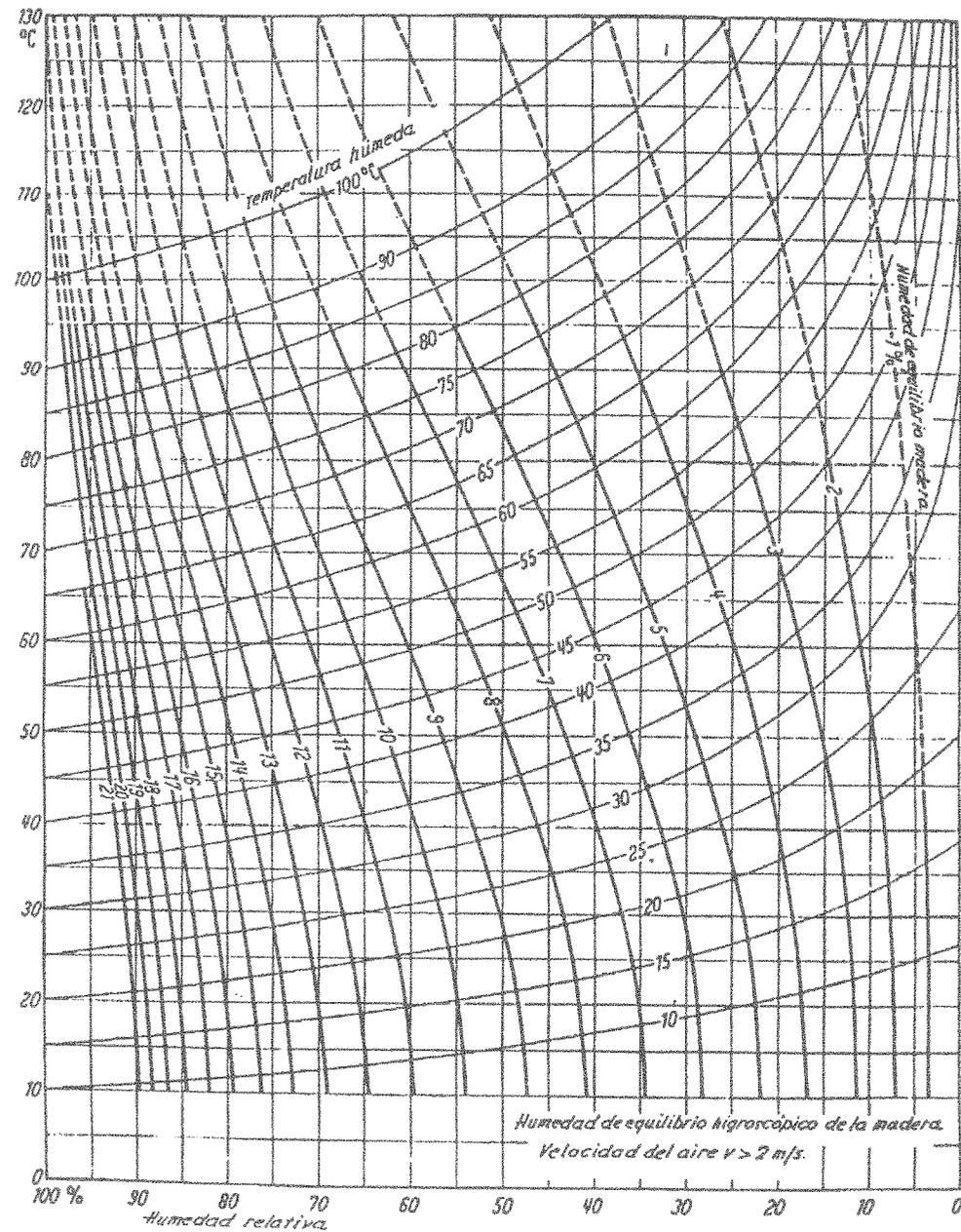
En estos aparatos no existen electrodos que deban ser introducidos en la madera sino que suelen constar de uno o dos electrodos planos que se aplican sobre la superficie de la madera.

En el mercado hay distintos tipos de xilohigrómetros de capacitancia, algunos de ellos montados en líneas continuas de producción, que permiten la medición de la humedad de la madera a gran velocidad.

Con independencia del tipo de aparato que se emplee es necesario efectuar una serie de comprobaciones previas a la medida que nos permitan asegurar que está funcionando y midiendo correctamente. Por pasos, éstas medidas deberán ser las siguientes:

- Comprobación del estado de la pila (la mayoría de los aparatos tienen un sistema de comprobación establecido por el propio fabricante).
- Comprobación de las conexiones eléctricas.
- Comprobación del estado de los electrodos (especialmente si el aparato es del tipo de resistencia y se emplean electrodos aislados lateralmente).
- Comprobación de que los selectores de especie y de temperatura están en la posición correcta, en caso de disponer de ellos. La temperatura a seleccionar será la de la madera, no la del clima (extremo éste muy importante cuando la madera está caliente, como en el caso de la procedente del interior de un secadero).
- Verificación del correcto funcionamiento. Para ello se emplearán resistencias calibradas (xilohigrómetros de resistencia) o bloques calibrados (xilohigrómetros de capacitancia). Para llevar a cabo esta operación se deberán seguir las recomendaciones del fabricante del aparato.
- Periódicamente deberá efectuarse una verificación multipunto (normalmente tres) que cubra los extremos del rango habitual de medida y el punto medio.

Hechas estas verificaciones se procederá a efectuar las medidas. En el caso de los xilohigrómetros de capacitancia se presionará suavemente el electrodo sobre la superficie de la pieza de madera y en el caso de los de resistencia se introducirán, salvo recomendación en contra del fabricante del aparato, paralelamente a la fibra y hasta una profundidad correspondiente a un tercio del espesor de la pieza. En estos últimos la medida se tomará pasados 2-3 segundos, no esperando más tiempo ya que las medidas suelen descender (debido a fenómenos electrolíticos).



1.2.- Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH)

La madera es un material higroscópico (es decir, que tiene apetencia por el agua) que va perdiendo o ganando humedad en función de la temperatura y humedad relativa del ambiente en que se encuentra hasta que alcanza una situación de equilibrio con el entorno. El valor del contenido de humedad de la madera en esta situación de equilibrio se denomina Humedad de Equilibrio Higroscópico y suele ser conocida con las siglas HEH (EMC en inglés, UGL en alemán y UEC en italiano).

La Humedad de Equilibrio Higroscópico es una propiedad de enorme trascendencia ya que cualquier madera en servicio o en proceso de secado tenderá a tomar o perder humedad hasta alcanzar dicho valor. El valor de la HEH varía con la temperatura y muy especialmente con la humedad relativa del medio circundante. La especie tiene poca influencia sobre el valor de la HEH aunque sí la historia previa del material (la HEH no es la misma en desorción que en sorción ni en una madera recién cortada con respecto a otra fatigada higroscópicamente tras repetir decenas de veces el ciclo sorción-desorción) y los tratamientos químicos que pueda incorporar la madera (especialmente si son en base a sales hidrosolubles). La determinación de la HEH se puede efectuar de forma aproximada empleando el ábaco de Keylwerth, figura 2.1, que recoge las curvas de la humedad de equilibrio de la madera en función de la humedad relativa y la temperatura del ambiente en donde está situada. Este ábaco también refleja el dato de la temperatura húmeda.

Para su más sencillo empleo, en la tabla 2.1. se aporta en forma tabulada los valores de la humedad relativa y de la diferencia psicrométrica en función de la temperatura seca y de la humedad de equilibrio de la madera. En los Anexos 3, 4 y 6 se aporta información obtenida directamente del ábaco de Keylwerth expresada en forma tabulada.

Por ejemplo, si un lote de madera se mantiene en un ambiente a 30°C y 43% de humedad relativa, antes o después y dependiendo del tamaño de las piezas alcanzará un contenido final de humedad cercano al 8%. Este dato puede tomarse tanto del ábaco de la figura 2.1 como de la tabla 2.1 o del Anexo 6.

Figura 2.1 Curvas de humedad de equilibrio de la madera y de temperatura húmeda del aire en función de la temperatura seca y la humedad relativa del aire (Ábaco de Keylwerth)

T°C	Variable	HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE LA MADERA HEH/UGL (%)																		
		20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
10	HR	90	89	85	82	79	76	73	69	64	59	54	47	40	34	29	25	17	11	7
	Ts-Th	0,8	0,9	1,3	1,5	1,8	2,1	2,3	2,7	3,2	3,6	4,1	4,8	5,5	6,0	6,6	7,2	7,8	8,4	8,9
15	HR	90	87	85	82	79	76	73	69	65	60	54	48	41	35	29	23	17	12	7
	Ts-Th	1,0	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,6	4,2	4,9	5,6	6,4	7,2	7,9	8,7	9,5	10,2	10,8
20	HR	89	87	85	83	80	77	74	70	66	60	55	48	41	35	29	23	17	12	7
	Ts-Th	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	3,1	3,6	4,1	4,9	5,6	6,6	7,6	8,5	9,4	10,3	11,3	12,1	13,0
25	HR	90	88	86	83	81	78	75	71	66	61	56	49	42	36	29	23	18	12	8
	Ts-Th	1,3	1,6	1,8	2,2	2,5	2,9	3,4	3,9	4,7	5,4	6,2	7,3	8,5	9,6	10,9	12,0	13,0	14,2	15,1
30	HR	90	89	87	84	81	78	75	72	67	62	57	50	43	37	30	24	18	13	8
	Ts-Th	1,4	1,6	1,9	2,3	2,8	3,3	3,7	4,2	5,0	5,9	6,8	8,1	9,4	10,7	12,1	13,5	14,9	16,1	17,4
35	HR	91	89	87	84	82	79	76	72	68	63	58	52	45	38	31	25	19	13	8
	Ts-Th	1,4	1,7	2,0	2,5	2,9	3,4	3,9	4,6	5,4	6,3	7,3	8,5	10,0	11,7	13,4	14,9	16,6	18,3	19,9
40	HR	91	90	87	85	83	80	77	73	69	64	59	53	46	39	32	26	20	14	8
	Ts-Th	1,5	1,7	2,2	2,6	2,9	3,5	4,1	4,8	5,6	6,7	7,7	9,1	10,8	12,6	14,5	16,3	18,2	20,2	22,4
45	HR	92	90	88	86	84	81	78	75	71	66	61	55	48	41	34	27	21	14	9
	Ts-Th	1,4	1,8	2,2	2,6	2,9	3,5	4,1	4,8	5,6	6,7	7,9	9,3	11,1	13,1	15,2	17,5	19,6	22,4	24,5
50	HR	92	91	89	87	85	83	80	76	72	67	63	57	49	43	36	29	22	15	9
	Ts-Th	1,5	1,7	2,1	2,5	2,9	3,3	4,0	4,9	5,8	6,9	7,9	9,5	11,7	13,5	15,7	18,2	21,0	24,1	27,0
55	HR	93	92	90	88	86	84	81	77	73	69	64	58	52	45	38	31	23	16	10
	Ts-Th	1,4	1,6	2,0	2,4	2,9	3,3	4,0	4,9	5,9	6,8	8,1	9,8	11,5	13,7	16,1	18,8	22,2	25,6	28,9
60	HR	94	93	91	89	87	85	82	79	75	71	66	60	53	47	40	33	25	17	11
	Ts-Th	1,3	1,5	1,9	2,3	2,8	3,3	4,0	4,7	5,7	6,7	8,0	9,7	11,9	13,9	16,4	19,2	22,8	27,0	30,7
65	HR	95	94	92	90	88	86	83	80	77	72	67	62	55	49	42	34	26	18	11
	Ts-Th	1,1	1,3	1,7	2,2	2,7	3,2	3,9	4,6	5,4	6,8	8,2	9,6	11,8	13,9	16,5	19,9	23,7	28,2	33,0
70	HR	96	95	93	91	89	87	85	82	78	74	70	64	58	51	44	36	28	20	12
	Ts-Th	0,9	1,1	1,6	2,1	2,6	3,0	3,5	4,3	5,4	6,5	7,6	9,4	11,4	13,8	16,5	20,0	23,9	28,6	34,4
75	HR	97	95	94	92	90	88	86	83	80	76	72	66	60	54	46	38	30	21	13
	Ts-Th	0,7	1,2	1,4	1,9	2,4	2,9	3,4	4,2	5,1	6,2	7,4	9,2	11,2	13,3	16,5	20,0	24,1	29,5	35,6
80	HR	96	95	93	92	90	87	84	81	78	73	68	62	56	48	40	32	23	14	
	Ts-Th	1,0	1,2	1,7	2,0	2,5	3,3	4,1	5,0	5,8	7,3	8,9	11,0	13,1	16,3	19,9	24,1	29,6	26,7	
85	HR	97	95	94	93	91	88	86	83	80	75	70	64	58	50	42	33	25	15	
	Ts-Th	0,7	1,3	1,5	1,8	2,3	3,2	3,7	4,6	5,5	7,0	8,6	10,7	12,9	16,1	19,8	24,4	29,6	37,6	
90	HR	96	95	94	92	90	87	84	81	77	73	67	60	53	44	35	26	16		
	Ts-Th	1,0	1,3	1,6	2,1	2,7	3,6	4,4	5,4	6,6	7,9	10,0	12,6	15,5	19,6	24,4	30,1	38,4		
95	HR	96	95	93	91	88	85	82	79	74	69	63	55	46	37	28	17			
	Ts-Th	1,1	1,4	1,9	2,5	3,4	4,3	5,2	6,2	7,9	9,6	11,9	15,2	19,3	24,1	29,9	39,1			
HEH/UGL		20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2

Tabla 2.1 Humedad relativa y diferencia psicrométrica en función de la temperatura y la humedad de equilibrio de la madera

Esta tabla 2.1 guarda una estrecha relación con la tabla 3.1 que se verá en el capítulo siguiente, ya que en ambas se aporta la misma información si bien reflejada de forma distinta.

1.3.- Humedad de uso

El conocimiento de la humedad de uso tiene una gran utilidad para determinar la humedad final del proceso de secado. La humedad de uso está muy relacionada con la humedad de equilibrio higroscópico de la madera correspondiente a la zona geográfica y al ambiente de uso (interior o exterior) en los que presumiblemente vaya a ser instalada la madera. En la tabla 2.2 se recogen las humedades de equilibrio de la madera para las distintas zonas geográficas y se incluye un valor del riesgo de cambios de dimensiones. El valor de riesgo se calcula en función del valor de la contracción esperado para cada localidad, dependiendo de que la madera se utilice en interiores o en exteriores; y se evalúa desde 2 (riesgo despreciable) hasta 10 (riesgo muy alto). Estos valores permiten clasificar las capitales de provincia por el riesgo máximo de cambio dimensional.

Si no se conoce ni la localidad ni el uso final donde será empleada la madera, es conveniente secarla hasta un contenido final de humedad del 8%.

2.- CONTRACCION (Hinchazón y merma)

La contracción (figura 2.2.) se produce solamente cuando la madera pierde humedad por debajo del «punto de saturación de la fibra» (PSF), umbral que como media se considera que es del 30%, siendo la variación dimensional proporcional al descenso de humedad sufrido (figura 2.3). Desde un punto de vista dimensional, el carácter anisótropo de la madera se refleja en que ésta se contrae más en la dirección tangencial (tangente a los anillos de crecimiento) que en la dirección radial (perpendicular a los anillos) así como en que en la dirección longitudinal (paralela a la dirección del hilo de la madera) la contracción es muy pequeña, casi despreciable (figura 2.4).

De forma análoga cuando la madera gana humedad, y por tanto aumenta su contenido de humedad, se hincha y aumenta sus dimensiones. El fenómeno de hinchazón, de forma análoga pero inversa al de contracción, se produce hasta que la madera alcanza el contenido de humedad correspondiente al punto de saturación de las fibras (30%). A partir de ese umbral podrá aumentar su contenido de humedad (ganará peso) pero no se producirán cambios dimensionales.

Este movimiento o «juego» de la madera se expresa por medio del coeficiente unitario de contracción, que es la variación en % de la dimensión considerada en la madera verde, para una disminución de una unidad porcentual en el contenido de humedad por debajo del Punto de Saturación de las Fibras. Su expresión, que es lineal, responde a:

$$C_D = \frac{D_h - D_0}{D_h \times PSF} \times 100$$

donde:

- CD = Coeficiente de contracción en la dimensión considerada (tangencial, radial).
- Dh = Dimensión considerada (tangencial, radial), en estado verde
- D0 = Dimensión, en estado totalmente seco (anhidro)
- PSF = Punto de Saturación de las Fibras, en %

Debe señalarse que el cambio dimensional producido por un cambio en el contenido de humedad de la madera puede traer consigo deformaciones en las piezas en función del grado de anisotropía (diferentes propiedades en las direcciones consideradas) de la madera considerada. No obstante, para una especie y cambio de humedad dados, la cuantía de la deformación puede ser oportunamente minimizada o magnificada en función del tipo de corte (radial, tangencial o mixto) que la

ALBACETE	(4 ^a -82%)	17,2	(24 ^a -47%)	8,5	(13 ^a -66%)	12,4	4,8	10,4	2	6,8
ALICANTE	(19 ^a -69%)	12,7	(26 ^a -61%)	10,8	(18 ^a -65%)	11,8	1,0	11,3	0,5	1,4
ALMERÍA	(16 ^a -76%)	15,0	(25 ^a -72%)	13,4	(18 ^a -73%)	13,9	1,1	13,6	0,3	1,4
ÁVILA	(2 ^a -82%)	17,2	(20 ^a -42%)	8,0	(10 ^a -64%)	11,9	5,3	9,9	2,0	7,3
BADAJOS	(9 ^a -80%)	16,2	(26 ^a -40%)	7,5	(17 ^a -61%)	11,0	5,2	9,2	1,8	7,0
BARCELONA	(22 ^a -74%)	14,1	(24 ^a -67%)	12,1	(16 ^a -70%)	13,2	1,1	12,6	0,6	1,5
BILBAO	(10 ^a -83%)	17,7	(12 ^a -70%)	13,3	(14 ^a -72%)	13,8	3,9	13,5	0,3	4,2
BURGOS	(3 ^a -89%)	20,7	(19 ^a -59%)	10,6	(11 ^a -72%)	13,8	6,9	12,2	1,6	8,5
CÁCERES	(8 ^a -77%)	15,3	(26 ^a -33%)	6,5	(16 ^a -57%)	10,5	4,8	8,5	2,0	6,8
CÁDIZ	(13 ^a -82%)	17,2	(25 ^a -66%)	11,9	(18 ^a -73%)	13,9	3,3	12,9	1,0	4,3
CASTELLÓN	(25 ^a -65%)	11,6	(11 ^a -59%)	10,9	(17 ^a -63%)	11,6	0,7	11,2	0,4	0,4
CIUDAD REAL	(5 ^a -73%)	14,1	(26 ^a -56%)	9,9	(15 ^a -65%)	12,0	2,1	10,9	1,1	3,2
CÓRDOBA	(10 ^a -78%)	15,6	(28 ^a -41%)	7,7	(18 ^a -61%)	11,0	4,6	9,3	1,7	6,3
CUENCA	(3 ^a -80%)	16,2	(22 ^a -48%)	8,9	(12 ^a -65%)	12,1	4,1	10,5	1,6	5,7
GERONA	(8 ^a -75%)	14,7	(24 ^a -62%)	11,0	(15 ^a -68%)	12,7	2,0	11,8	0,9	2,9
GRANADA	(7 ^a -76%)	15,0	(25 ^a -39%)	7,4	(15 ^a -60%)	11,0	4,0	9,2	1,8	5,8
GUADALAJARA	(6 ^a -83%)	17,7	(24 ^a -44%)	8,1	(14 ^a -64%)	11,8	5,9	9,9	1,9	7,8
HUELVA	(12 ^a -76%)	15,0	(25 ^a -53%)	9,5	(18 ^a -65%)	11,9	3,1	10,7	1,2	4,3
HUESCA	(5 ^a -82%)	17,2	(23 ^a -51%)	9,4	(13 ^a -66%)	12,3	4,9	10,8	1,5	6,4
JAÉN	(9 ^a -81%)	16,7	(28 ^a -49%)	8,9	(17 ^a -67%)	12,0	4,7	10,4	1,6	6,3
LA CORUÑA	(15 ^a -81%)	16,7	(12 ^a -76%)	15,0	(14 ^a -79%)	16,0	1,0	15,5	0,5	1,2
LAS PALMAS	(23 ^a -80%)	16,0	(19 ^a -74%)	14,2	(21 ^a -77%)	15,1	0,9	14,6	0,5	1,4
LEÓN	(3 ^a -85%)	18,7	(20 ^a -52%)	9,5	(11 ^a -68%)	12,8	5,9	11,1	1,7	7,6
LÉRIDA	(6 ^a -85%)	18,7	(25 ^a -49%)	8,8	(15 ^a -67%)	12,5	6,2	10,6	1,9	8,1
LOGROÑO	(6 ^a -80%)	16,2	(22 ^a -60%)	10,8	(13 ^a -70%)	13,2	3,0	12,0	1,2	4,2
LUGO	(6 ^a -87%)	19,7	(18 ^a -72%)	13,6	(12 ^a -79%)	15,9	3,8	14,7	1,2	5,0
MADRID	(6 ^a -79%)	15,9	(24 ^a -42%)	7,8	(14 ^a -62%)	11,4	4,5	9,6	1,8	6,3
MÁLAGA	(16 ^a -72%)	13,8	(26 ^a -63%)	11,2	(19 ^a -67%)	12,3	1,5	11,7	0,6	2,1
MURCIA	(12 ^a -68%)	12,8	(26 ^a -52%)	9,3	(18 ^a -57%)	10,3	2,5	9,8	0,5	3,0
ORENSE	(7 ^a -84%)	18,2	(22 ^a -64%)	11,5	(14 ^a -74%)	14,4	3,8	12,9	1,5	5,3
OVIEDO	(7 ^a -78%)	15,6	(9 ^a -75%)	14,1	(13 ^a -77%)	15,3	1,2	14,7	0,6	0,9
PALENCIA	(4 ^a -82%)	17,2	(21 ^a -52%)	9,5	(12 ^a -67%)	12,6	4,6	11,0	1,7	6,2
PALMA DE M.	(10 ^a -83%)	17,7	(21 ^a -69%)	12,8	(17 ^a -75%)	14,7	3,0	13,7	1,0	4,0
PAMPLONA	(5 ^a -79%)	15,9	(20 ^a -59%)	10,6	(12 ^a -66%)	12,4	3,5	11,5	0,9	4,4
PONTEVEDRA	(10 ^a -83%)	17,7	(20 ^a -69%)	12,8	(15 ^a -76%)	15,0	2,7	13,9	1,1	3,8
SALAMANCA	(4 ^a -83%)	17,7	(22 ^a -48%)	8,9	(12 ^a -65%)	12,1	5,6	10,5	1,6	7,2
S. SEBASTIÁN	(19 ^a -82%)	16,9	(11 ^a -70%)	13,3	(13 ^a -78%)	15,6	2,3	14,4	1,2	2,5
SANTANDER	(17 ^a -81%)	16,7	(12 ^a -74%)	14,4	(14 ^a -78%)	15,6	1,2	15,0	0,6	1,7
SEGOVIA	(2 ^a -81%)	16,7	(22 ^a -45%)	8,4	(11 ^a -64%)	11,9	4,8	10,1	1,8	6,6
SEVILLA	(11 ^a -80%)	16,2	(28 ^a -49%)	8,9	(18 ^a -69%)	12,8	3,9	10,8	2,0	5,4
SORIA	(3 ^a -84%)	18,2	(20 ^a -53%)	9,7	(10 ^a -67%)	12,6	5,6	11,1	1,5	7,1
TARRAGONA	(17 ^a -72%)	13,8	(10 ^a -66%)	2,4	(16 ^a -71%)	13,5	1,1	12,9	0,6	0,9
S.C.TENERIFE	(19 ^a -65%)	11,9	(24 ^a -55%)	9,8	(21 ^a -61%)	11,0	1,2	10,4	0,6	1,5
TERUEL	(4 ^a -80%)	16,2	(22 ^a -69%)	12,8	(12 ^a -75%)	14,7	1,9	13,7	1,0	2,5
TOLEDO	(6 ^a -78%)	15,6	(26 ^a -37%)	7,1	(15 ^a -59%)	10,9	4,7	9,0	1,9	6,6
VALENCIA	(18 ^a -74%)	14,2	(18 ^a -67%)	12,3	(17 ^a -70%)	13,2	1,0	12,7	0,5	1,5
VALLADOLID	(4 ^a -84%)	18,2	(20 ^a -40%)	7,7	(12 ^a -62%)	11,5	6,7	9,6	1,9	8,6
VITORIA	(5 ^a -87%)	19,7	(19 ^a -71%)	13,3	(12 ^a -77%)	15,3	4,4	14,3	1,0	5,4
ZAMORA	(4 ^a -87%)	19,7	(21 ^a -59%)	10,6	(12 ^a -72%)	13,8	5,9	12,2	1,6	7,5
ZARAGOZA	(7 ^a -75%)	14,7	(24 ^a -50%)	9,0	(15 ^a -61%)	11,2	3,5	10,1	1,1	4,6

Tabla 2.2 Valores recomendados de la humedad de la madera y riesgo de cambio dimensional en España

NOTAS A LA TABLA 2.2.

- 1^a. - Los valores entre paréntesis representan la temperatura y humedad relativa media del aire del mes más húmedo, del mes más seco y anual respectivamente.
- 2^a. - Madera para uso exterior: Madera situada en lugares abiertos pero protegidos de la lluvia
- 3^a. - Madera para uso interior: Madera situada en locales cerrados con calefacción y aire acondicionado
- 4^a. - Riesgo exterior o riesgo de cambio dimensional (movimiento) de la madera en uso exterior en una cierta localidad: Se define como la máxima variación del contenido de humedad, en valor absoluto, que puede experimentar una pieza de madera que es colocada en uso con su humedad recomendada, debido a los naturales cambios climáticos estacionales.
- 5^a. - Riesgo interior: Se define como la diferencia, en valor absoluto, entre la humedad recomendada para uso interior en un cierto lugar y la humedad recomendada para uso exterior o la humedad mínima anual que se pueda alcanzar en ese mismo lugar.
- 6^a. - Riesgo máximo: Diferencia entre la humedad máxima anual y la recomendada para uso interior.

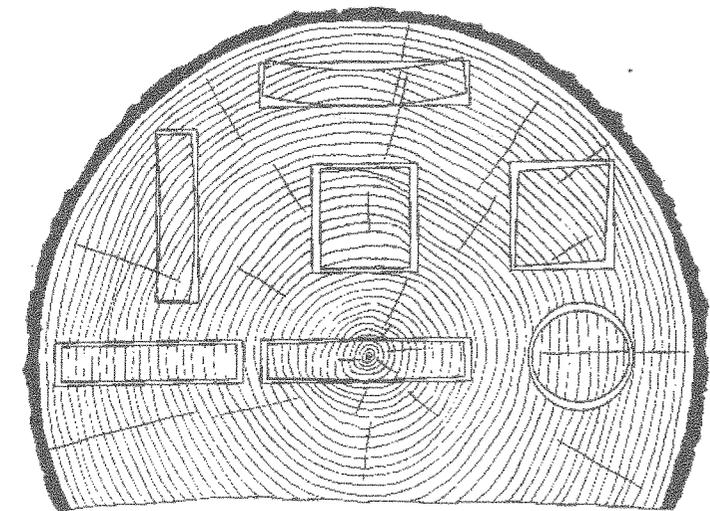


Figura 2.2. Contracciones según la forma de la sección y su procedencia en el tronco

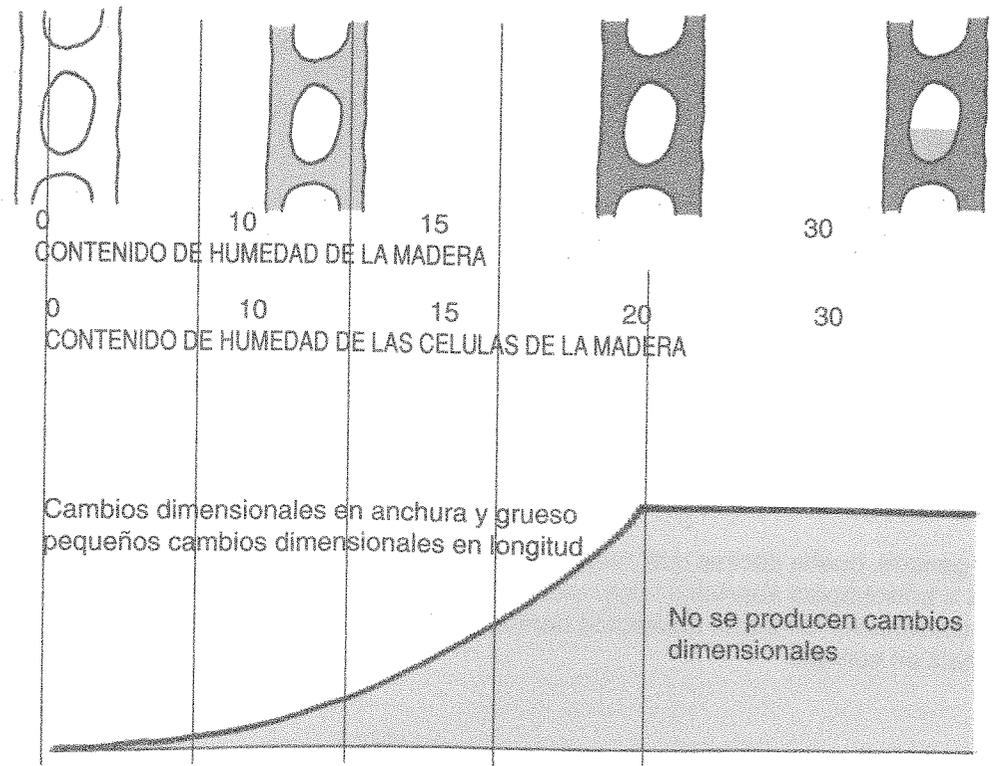


Figura 2.3. Cambios dimensionales en la madera asociados a descensos en su contenido de humedad

pieza de madera presente, así como adoptando determinadas estrategias (colocación de pesos o aplicación de presión en lo alto de la carga) durante el proceso de carga del secadero.

También es preciso señalar que el porcentaje de merma de una determinada madera puede aumentar hasta en un 1,5% al aumentar la temperatura seca empleada durante el secado. Así maderas secadas con temperaturas secas elevadas pueden presentar porcentajes de merma superiores y en cierta medida niveles de deformación más elevados. Esto es especialmente patente cuando se secan maderas con elevados porcentajes de madera juvenil (por ejemplo, entre las maderas españolas, el pino radiata, el pino laricio y en menor medida el pino silvestre).

Es importante que el industrial tome conciencia que las mermas y cierto nivel de deformación y rajado son consecuencia inevitable del propio proceso de secado de la madera ya que éste es un material higroscópico y anisótropo. No obstante lo anterior, en procesos de secado muy rápido habrá que tomar medidas específicas (de aplicación de cargas, de clasificación previa del material, de control de la humedad relativa, de acondicionamiento final, etc.) para controlar que los niveles de deformación, de aparición de fendas de cara y testa o incluso de colapso son aceptables (aunque un determinado nivel siempre hará acto de presencia).

Desde el punto de vista del secado, la contracción de la madera es un factor de gran trascendencia, tanto en lo que se refiere a la calidad de la madera seca como al cálculo del coste de la operación. En la tabla 2.3 se recogen, por especies, los valores medios de las contracciones totales (tangencial, radial y volumétrica).

Dentro del concepto general de cambio dimensional existen para cada madera dos coeficientes cuyos valores dan una clara indicación del riesgo de que se produzcan deformaciones indeseables, tales como el atejado o abarquillado, provocadas por los cambios dimensionales originados por las variaciones en el contenido de humedad de la madera. Estos coeficientes son los siguientes:

- el coeficiente de anisotropía, que se expresa como el cociente entre las contracciones totales tangencial y radial
- la anisotropía absoluta, que se expresa como la diferencia entre las contracciones totales tangencial y radial.

En general, puede decirse que coeficientes de anisotropía superiores a 2,2 asociados a anisotropías absolutas superiores al 3% producen riesgos no despreciables de deformación en forma de atejado durante el secado o durante su posterior puesta en servicio.

Tabla 2.3
Contracciones totales de la madera

ESPECIE	CONTRACCIONES TOTALES (%)		
	Tangencial	Radial	Volumétrica
Haya	10.9	5.3	16.1
Roble	6.4	3.5	9.9
Olmo	9.2	6.3	15.5
Fresno	11.2	6.3	17.5
Castaño	6.1	3.2	9.3
Carpe	11.6	7.5	19.1
Abedul	9.0	6.0	15.0
Nogal	9.2	6.5	15.6
Cerezo	9.9	4.2	14.1
Chopo	7.4	2.6	9.9
Aliso	9.0	4.4	13.3
Arce	10.6	6.6	17.2
Tilo	9.0	5.5	14.5
Okume	6.1	4.1	10.2
Niangon	8.3	4.3	12.5
Sipo	7.0	6.2	13.2
Iroko	6.4	4.4	10.8
Doussié	8.2	5.0	13.2
Teca	5.7	2.9	8.6
Azobé	10.9	8.1	19.0
Abeto	6.7	3.8	10.4
Picea	8.6	4.1	12.7
Pino pinaster	7.0	3.5	10.5
Pino silvestre	9.9	4.8	14.7
Pino laricio	7.6	5.0	12.6
Pino radiata	7.5	4.8	12.3
Pino amarillo	9.0	5.0	14.0
Pino Oregón	7.8	2.4	12.9
Alerce	4.8	5.0	7.2
Eucalyptus globulus	14.0	8.0	22.0

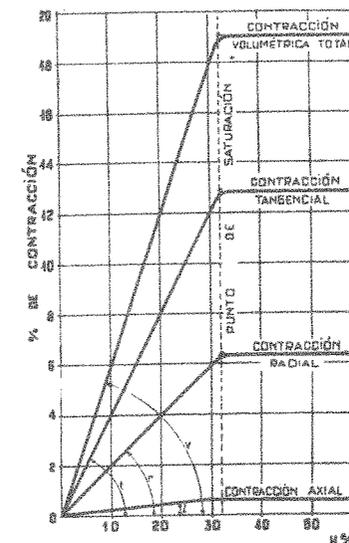


Figura 2.4. Contracción de la madera en función de la dirección y de la variación en el contenido de humedad

NOTA: El valor de la contracción total desde el estado verde hasta la humedad h (%) considerada, puede calcularse, aproximadamente, de los valores de esta tabla mediante la expresión $[(PSF-h)/PSF] \times C$, donde C puede ser la contracción radial, tangencial o volumétrica

Tabla 2.4
COEFICIENTES DE CONTRACCION DIMENSIONAL Y RIESGO DE ATEJADO DE ALGUNAS ESPECIES

ESPECIES	Coef. Contracción		ANISOTROPIA		RIESGO DE ATEJAMIENTO	DENSIDAD 12% (Kg/m ³)	PSF (%)
	Radial C _r	Tangencial C _t	Coef. Absoluta	Absoluta			
CONIFERAS							
Pino radiata	0.16	0.25	1.8	3.3	Medio	504	30
Pino pinaster	0.13	0.26	1.9	3.3	Medio	530	27
Pino silvestre	0.16	0.33	1.8	3.2	Medio	520	30
Pino laricio	0.21	0.30	1.5	2.6	Medio	585	30
Alerce europeo	0.15	0.30	2.0	3.6	Medio	570	24
Pino de Oregón	0.18	0.28	1.6	1.5	Bajo	530	28
Hemlock (Tsuga)	0.19	0.34	2.1	2.4	Bajo	485	29
Picea abies	0.15	0.32	2.6	3.0	Medio	428	27
Abeto (Abies)	0.13	0.23	2.7	2.5	Bajo	397	29
Picea sitchensis	0.15	0.28	2.3	2.6	Bajo	437	29
Cedro rojo (Tuja)	0.08	0.20	2.9	1.8	Bajo	370	23
FRONDOSAS BOREALES							
Fresno europeo	0.19	0.34	2.0	3.3	Medio	684	33
Haya	0.17	0.35	2.0	5.5	Medio/Alto	620	31
Cerezo	0.14	0.33	3.2	4.1	Alto	635	30
E. globulus	0.17	0.39	2.3	5.7	Alto	740	26
Carpe	0.22	0.37	2.1	3.9	Medio	744	34
Arce	0.20	0.32	2.6	3.9	Medio/Alto	640	33
Roble							
*Rojo americano	0.17	0.33	2.3	3.5	Medio	590	31
*Blanco americano	0.24	0.40	1.8	3.4	Medio	640	26
*Blanco europeo	0.12	0.22	1.7	2.4	Bajo	641	29
Peral	0.18	0.33	2.5	2.9	Medio	695	29
Aliso	0.15	0.31	2.2	4.9	Alto	540	29
Robinia	0.16	0.22	1.4	2.0	Bajo	760	30
Castaño	0.11	0.21	2.2	4.3	Medio/Alto	544	29
Sicamoro (Acer)	0.11	0.24	3.0	3.2	Medio/Alto	538	34
Chopo	0.08	0.23	3.0	5.0	Alto	380	32
Nogal americano	0.19	0.27	1.9	2.0	Bajo	573	34
Olmo europeo	0.19	0.28	1.7	2.1	Bajo	572	33

ESPECIES	Coef. Contracción		ANISOTROPIA		RIESGO DE ATEJAMIENTO	DENSIDAD 12% (Kg/m ³)	PSF (%)
	Radial C _r	Tangencial C _t	Coef. Absoluta	Absoluta			
FRONDOSAS TROPICALES							
Afrormorsia	0.19	0.39	2.2	1.7	Bajo	744	23
Andiroba	0.21	0.35	1.9	1.9	Bajo	596	28
Azobé	0.31	0.42	1.5	1.5	Bajo	1024	26
Bossé	0.17	0.26	2.0	1.9	Bajo	626	31
Palo rosa	0.23	0.39	2.0	2.6	Bajo	863	26
Bubinga	0.23	0.35	1.8	1.8	Bajo	828	28
Dibetou	0.22	0.23	1.5	1.0	Bajo	606	27
Doussié	0.21	0.34	1.9	1.0	Muy bajo	725	24
Framiré	0.15	0.22	1.6	0.7	Muy bajo	547	25
Greenheart	0.29	0.33	1.2	0.7	Muy bajo	942	24
Guatambú	0.19	0.39	2.1	2.2	Bajo	785	24
Ipé	0.26	0.35	1.5	0.9	Muy bajo	955	23
Iroko	0.19	0.28	1.7	1.0	Muy bajo	600	23
Kosipo	0.15	0.20	1.3	1.5	Muy bajo	643	30
Lauán rojo	0.18	0.33	2.4	3.6	Medio	626	33
Jatoba	0.13	0.27	2.1	3.2	Medio	853	22
Keruing	0.25	0.42	2.0	3.7	Medio	790	32
Limba	0.17	0.26	2.0	1.4	Bajo	498	28
Caoba	0.15	0.23	1.6	0.7	Muy bajo	472	25
Caoba africana	0.19	0.31	1.9	1.4	Muy bajo	546	27
Meranti	0.18	0.34	2.2	2.1	Bajo	630	28
Merbau	0.19	0.28	1.8	1.1	Muy bajo	813	24
Niangón	0.17	0.33	2.9	3.5	Medio/Alto	647	25
Obeche	0.11	0.19	2.1	1.3	Bajo	339	26
Okume	0.14	0.21	2.0	1.8	Bajo	433	29
Padauk	0.18	0.27	1.6	0.4	Muy bajo	718	17
Peroba	0.22	0.36	1.8	1.7	Bajo	720	23
Ramín	0.19	0.38	3.0	3.7	Medio/Alto	651	27
Sapelli	0.23	0.29	1.5	1.3	Muy bajo	669	29
Seraya	0.17	0.32	2.3	2.1	Bajo	594	28
Sipo	0.22	0.25	1.3	0.7	Muy bajo	644	28
Teka	0.13	0.26	2.1	1.3	Bajo	673	22
Tiama	0.19	0.31	1.7	1.6	Bajo	638	29
Virola	0.25	0.33	2.4	4.1	Alto	514	34
Wengé	0.26	0.42	1.7	1.3	Muy bajo	890	20
Zingana	0.19	0.36	2.1	2.7	Medio	770	28

En la Tabla 2.4 se recogen los coeficientes de contracción unitarios (tangencial y radial), el valor de la anisotropía (expresada como coeficiente y como anisotropía absoluta), el riesgo de atejado, la densidad al 12% y el punto de saturación de la fibra (PSF) de algunas especies.

3.- DENSIDAD

Así como cada material suele tener un único valor de la densidad, la madera, al ser un cuerpo higroscópico en el que su masa y volumen (éste solo hasta alcanzar el PSF) varían en función de su contenido de humedad, ésta presenta diversos valores.

En la madera se denomina densidad al cociente entre la masa (M) y el volumen (V) de la madera a una humedad dada (h), expresado en kg/m³.

$$D_h = \frac{M_h}{V_h}$$

El valor de la densidad, por tanto, siempre ha de ir referenciado con el contenido de humedad para el que se da.

Los valores de densidad que más se utilizan son los siguientes:

- **densidad anhidra:** cociente entre la masa y el volumen al 0% de humedad (M0/V0). Suele ser un dato científico, sin mayor utilidad en el secado.
- **densidad normal:** cociente entre la masa y el volumen al 12% (en Francia el 15%) de humedad (M12/V12). Suele ser el dato empleado para comparar entre especies.
- **densidad verde:** cociente entre la masa y el volumen de una madera recién cortada (Ms/Vs)
- **densidad básica:** cociente entre la masa anhidra y el volumen en verde (M0/Vs). Aporta el dato de la cantidad de madera realmente existente en un volumen en verde de madera.

En la tabla 2.5 se recogen los valores medios indicativos de las densidades

anhidra, normal y básica de algunas especies de interés comercial. Para la densidad en verde puede considerarse un valor medio de 1.000 kg/m³.

Tabla 2.5
Densidades en kg/m³, por tipos y especies

Especie	Densidad	Densidad	Densidad
	Anhidra	12%	básica
Haya	586	620	500
Roble	583	641	520
Olmo	541	572	468
Fresno	653	684	550
Castaño	512	544	445
Carpe	714	744	595
Abedul	610	645	520
Nogal	541	573	470
Cerezo	608	635	520
Chopo	350	380	316
Aliso	500	540	440
Arce	609	640	520
Abeto	377	397	335
Picea	407	428	350
P. pinaster	495	530	435
P. silvestre	489	520	430
P. radiata	470	504	410
P. laricio	556	585	485
P. Douglas	495	530	435
Alerce	534	570	465
Okume	400	433	360
Niangon	614	647	530
Sipo	609	644	525
Iroko	577	600	515
Doussié	692	725	580
Teca	636	673	540

Como ya se apuntaba en el capítulo 1, la densidad es una característica que tiene una gran influencia en el secado.

- una madera con densidad elevada se caracteriza por presentar paredes celulares gruesas y lúmenes de pequeño diámetro, por lo cual ofrecerá

una mayor resistencia al paso del agua por su interior que una madera ligera, con grandes lúmenes y paredes muy delgadas.

- las maderas densas tienen capacidad de fijación de agua (higroscópica) diferente a las ligeras. A igualdad de contenido de humedad, una madera densa fija en su interior mucha mayor cantidad de agua que una ligera, lo que se traducirá en tiempos de secado más prolongados.

El conocimiento de los valores de la densidad para la madera que se está secando puede ser de gran utilidad para:

- calcular la cantidad de agua que es necesario evaporar en un lote de madera para pasar de una humedad inicial h_i a una final h_f .
- calcular la cantidad de agua contenida en un lote de madera.
- elegir el programa de secado más adecuado
- tener una indicación de las propiedades de la madera, ya que casi todas las propiedades de la madera se relacionan con su densidad.

La cantidad de agua que es necesario evaporar se calcula mediante la expresión (siendo $h_i > 30\%$):

$$M = \frac{M_0}{V_s} \times V_i \times \frac{h_i - h_f}{100}$$

En donde :

- M = Cantidad de agua, en kg por m³
- M₀/V_s = Densidad básica, en kg/m³
- V_i = Volumen de madera a secar, en m³
- h_i, h_f = Humedad inicial y final de la madera, en tantos por ciento

Ejemplo: Una madera de pino radiata que entra en el secadero con un contenido de humedad de 120% (valor de h_i) y se pretende que salga a 10% (valor de h_f), deberá perder por cada m³ de madera verde una masa M de agua, calculada del siguiente modo:

$$M = 410 \times 1 \times (120-10)/100 = 451 \text{ kg}$$

(De acuerdo con los datos de la tabla 2.4, la densidad básica de la madera de pino radiata toma el valor de 410).

4.- MOVIMIENTO DEL AGUA EN LA MADERA

El secado de la madera es un fenómeno consistente en la eliminación superficial del agua, a la vez que esta migra desde el interior hacia el exterior de la madera. Conforme avanza el secado, el frente de evaporación, que al principio estaba en la superficie, se interioriza dentro de la madera por lo que el proceso de evaporación se efectuará en su seno, migrando el agua, en forma de vapor y de agua ligada, mediante un fenómeno que sigue las leyes de la difusión, desde el frente de evaporación hasta la superficie exterior de la madera. El fenómeno termina cuando la pieza de madera alcanza en su conjunto la humedad de equilibrio higroscópico (HEH).

Cuando la madera se encuentra en estado verde, el agua líquida rellena todas las cavidades celulares, existiendo normalmente burbujas de aire en su seno. El proceso de circulación del agua libre desde el interior hacia el frente de evaporación, donde pasa a estado gaseoso, se efectúa por la acción de fuerzas de tipo capilar, generadas por la existencia de meniscos en las interfases aire-agua de los poros de las membranas de las punteaduras. El proceso en esta fase es altamente dependiente del tamaño de los capilares donde se generan los citados meniscos, siendo las fuerzas tanto mayores conforme estos capilares son más estrechos.

La presencia de burbujas de aire en el interior del agua líquida presente en el interior de la célula ayuda en el proceso ya que el calentamiento del aire interior, por acción de la temperatura, obliga a su dilatación, empujando al agua hacia el exterior a través de los capilares citados.

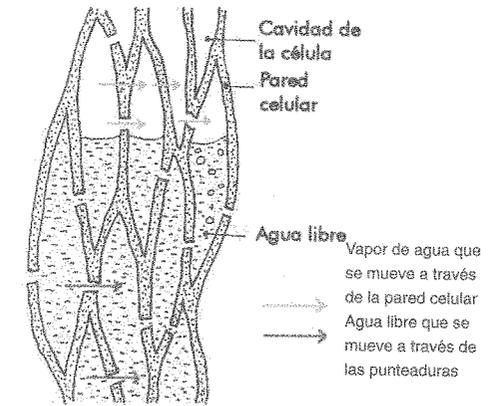
En ocasiones las maderas presentan capilares de tamaño extremadamente reducido, lo que hace que las tensiones generadas en el interior de la célula sean muy elevadas, llegando a superar a la máxima resistencia al aplastamiento de la madera, produciéndose entonces un fenómeno de aplastamiento de las fibras (similar al que ocurre cuando se aspira fuertemente el agua contenida en una botella de plástico), conocido como colapso. La presencia de las burbujas de aire en el interior de las cavidades celulares hace muy difícil la aparición del colapso, motivo por lo cual éste suele presentarse sólo en maderas altamente impermeables (capilares reducidos) y en zonas donde no existan burbujas de aire. Esto explica la causa por la cual el colapso se produce únicamente en determinadas maderas muy impermeables (por ejemplo en eucalipto, roble, castaño, haya) y solamente en la primera fase del secado, cuando la madera está totalmente verde. Todos los factores aceleradores del secado (por ejemplo la temperatura seca muy elevada o la humedad relativa muy baja) acrecientan el riesgo de colapso en maderas susceptibles para ello.

Evaporada el agua líquida ésta tiene que migrar, por difusión, desde el frente de evaporación hasta la superficie de la pieza, donde es eliminada por el aire que circula dentro del secadero.

Este fenómeno registrará el proceso de secado desde su principio si la madera es introducida ya presecada (contenido de humedad inferior al 30%) en el secadero.

La difusión es un fenómeno conocido que sigue unas leyes determinadas y que puede ser debido a la existencia de gradientes de humedad (la humedad migra de las zonas de alta concentración a las de baja concentración), de temperatura (la humedad migra de las zonas calientes a las frías), a su combinación o a causas algo más complejas, actualmente en estudio. En estas circunstancias, una buena práctica de secado tratará de conseguir que los gradientes de temperatura y humedad actúen en el mismo sentido, o que su balance sea positivo hacia el exterior, de forma que la humedad migre desde el interior hacia el exterior de la forma más rápida posible.

El proceso de la difusión depende de la temperatura. El valor del coeficiente de difusión aumenta exponencialmente con la temperatura, motivo por lo cual por debajo del PSF el secado es más rápido conforme mayor sea la temperatura de la madera. Es por esta razón por la cual al ir disminuyendo el contenido de humedad e ir ralentizándose el proceso de la difusión, es necesario aumentar la temperatura gradualmente para



MADERA VERDE

Figura 2.6. Esquema del movimiento del agua líquida y del vapor de agua dentro de la madera

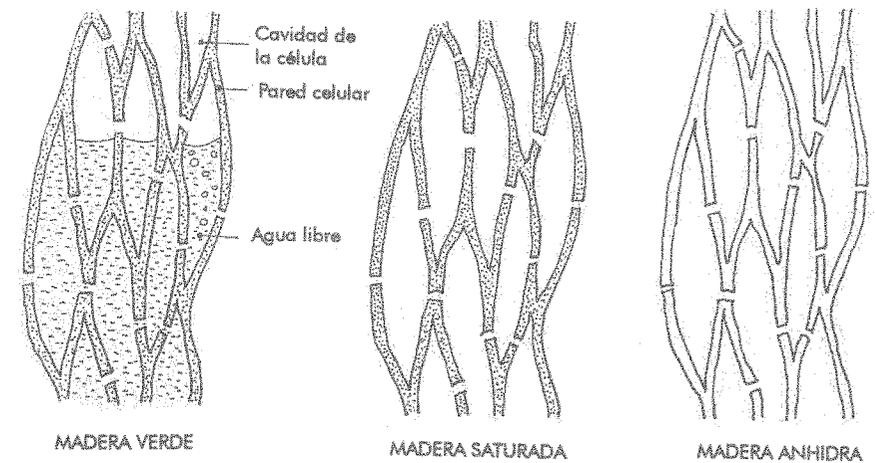


Figura 2.5. Formas de presentación del agua en la madera (madera verde, madera con una humedad del 30% y madera anhidra)

conseguir que el ritmo de la difusión se mantenga constante. Esta es la causa de que los programas de secado hagan uso de temperaturas cada vez más altas y humedades relativas cada vez más bajas en el secadero conforme el contenido de humedad disminuye.

Los programas de secado, que serán tratados en otro capítulo, son recetas basadas en la práctica que tratan de extraer el agua, tanto libre (primera fase) como ligada (segunda fase) a la máxima velocidad permitida por cada madera. Se basan en una larga experimentación y no deben ser consideradas como reglas inmutables, sino como recomendaciones de carácter general que deben ser adaptadas a las características especiales de cada secadero y madera.

En las figuras que aparecen a continuación se detallan de forma sencilla los siguientes aspectos: las distintas formas de la presencia del agua en el interior de la madera (madera verde, madera con una humedad del 30 % y madera anhidra o al 0%) (figura 2.5) y esquema del movimiento del agua líquida y del vapor de agua dentro de la madera (figura 2.6).

Notas

^[2] La norma UNE-EN 13183-2 establece que los electrodos, salvo indicación contraria del fabricante del aparato, serán introducidos paralelamente al sentido de la fibra de la madera.