

Interreg
POCTEFA
iForWood



El secado de especies pirenaicas

Aspectos generales y apoyos técnicos para seis especies pirenaicas.

(Roble, Haya, Abeto, Pino silvestre, Pino radiata y Pino negro)

• **Guía técnica** •

Realizado por CRITT Bois Occitanie:



Con la participación de:



Nota a la traducción al castellano: El documento que se presenta es la traducción de la “*Le séchage des essences pyrénéennes. Généralités & Appuis techniques pour six essences pyrénéennes (Chêne, Hêtre, Sapin Pectiné, Pin Sylvestre, Pin Radiata et Pin à Crochets).* Guide Technique.” elaborada por CRITT Bois Occitanie. El documento original combina la teoría técnica genérica de secado de la madera con información específica de las seis especies pirenaicas más comúnmente utilizadas en Francia, así como consideraciones técnicas y normativa del país francés. Por tanto, el documento da a conocer como se trabaja en el país vecino y permite al lector contrastar los procedimientos que se aplican en España.

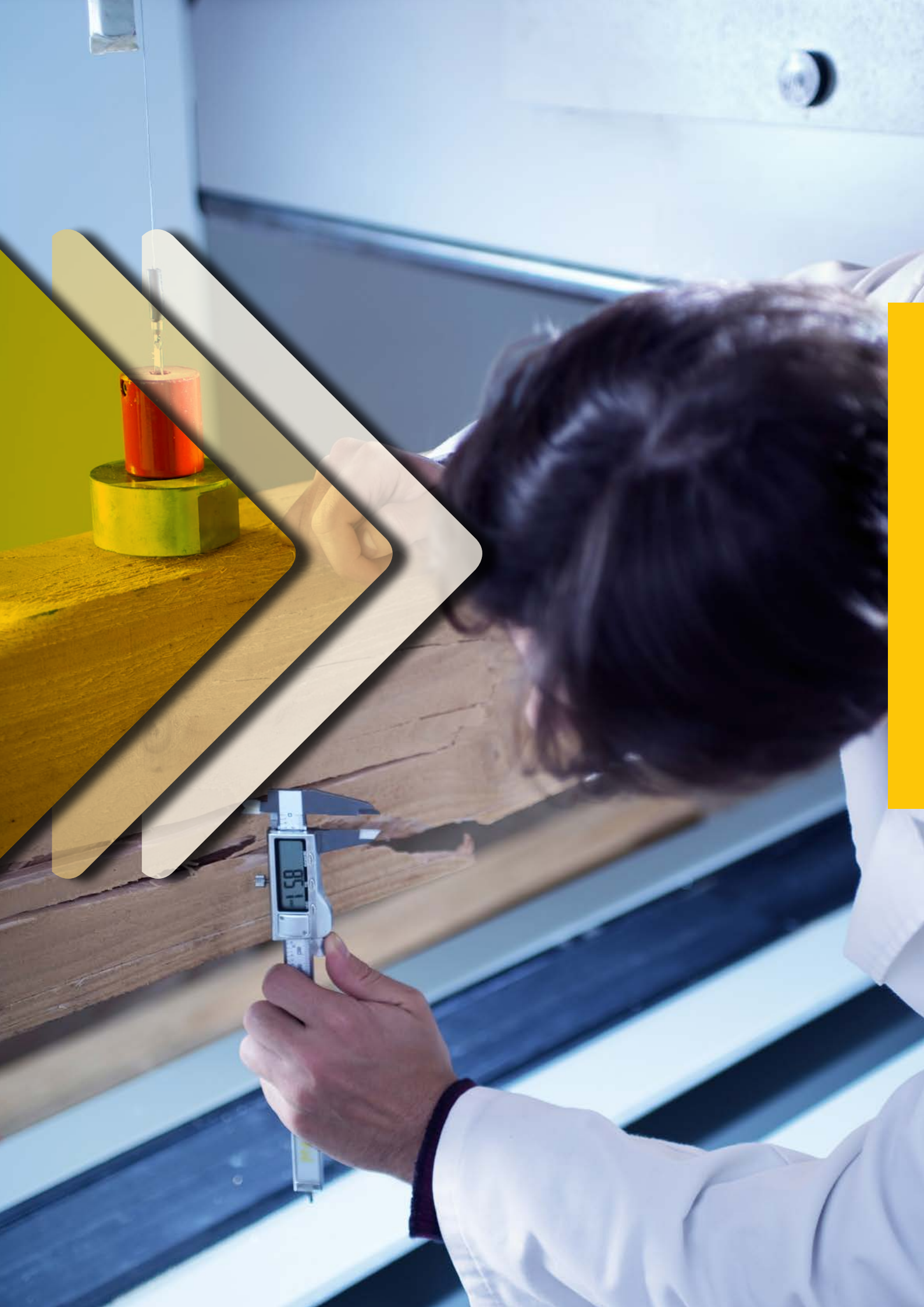


Por qué una guía técnica sobre el secado de las especies pirenaicas?

CRITT Bois Occitanie – Rodez (12) – Francia

La demanda del mercado de productos secados ha aumentado fuertemente desde 2009 aunque muestra una cierta brecha entre la situación regional y la nacional: El 12% de los productos de madera se secan en Francia, mientras que el 6% lo hacen en Occitania (véase Enquête du Ministère de l'Agriculture et de l'alimentation –Informe del Ministerio de Agricultura y Alimentación francés– diciembre de 2017). La presente guía pretende simplemente recordar algunas de las bases teóricas necesarias para que todo empresario integre, con total conocimiento de causa, el método de secado en su producción y que sea capaz de gestionar y optimizar sus propios equipos.

Vood





Origen del proyecto

iForWood

Innovación en la movilización y la transformación de la madera pirenaica

iForWood es un proyecto de cooperación entre Francia y España que pretende reforzar la innovación en la movilización y la transformación de la madera pirenaica. El punto cuatro del proyecto se centra en el apoyo al sector forestal y al de la transformación industrial de la madera estando dirigidas en particular a las empresas de la primera y segunda transformación de la madera. El proyecto se estructura en cinco acciones:

- La clasificación mecánica de la madera.
- El secado de especies pirenaicas.
- La comercialización de los productos de madera del Pirineo.
- La calidad medioambiental de las colas.
- El desarrollo de nuevos productos en madera pirenaica.

La presente guía constituye la culminación de la acción número 2 acerca del secado de especies pirenaicas. Pretendemos incrementar las competencias de los aserraderos pirenaicos a través de la promoción de la técnica de secado de la madera y dar a los operadores las herramientas necesarias y suficientes para llevar a cabo un proceso de secado eficaz y que garanticen el control de la calidad. Esto debe permitir a los operadores informarse de los procedimientos de seguimiento y control de acuerdo con la especie empleada y formalizarlos.

Esta guía de secado tratará de adaptarse al bosque pirenaico siguiendo los siguientes elementos:

- Conocimiento básico del proceso de secado, de las posibilidades y límites del material.
- Tipos de carga y conducción de ciclos (colocación de las pilas, utilización de sondas de control...).
- Conocimiento de los procesos de medidas, de control de la madera y del material (medida de la humedad de la madera, apilado, tamaño y disposición de las tablas...).
- Conocimiento de referencias de tiempo/calidad.
- Método de diagnóstico en caso de error.
- Procedimiento de recepción y control en caso de prestaciones a cuenta de terceros.

Esta herramienta quiere ser un apoyo pedagógico a los operadores para que se familiaricen con las recomendaciones.

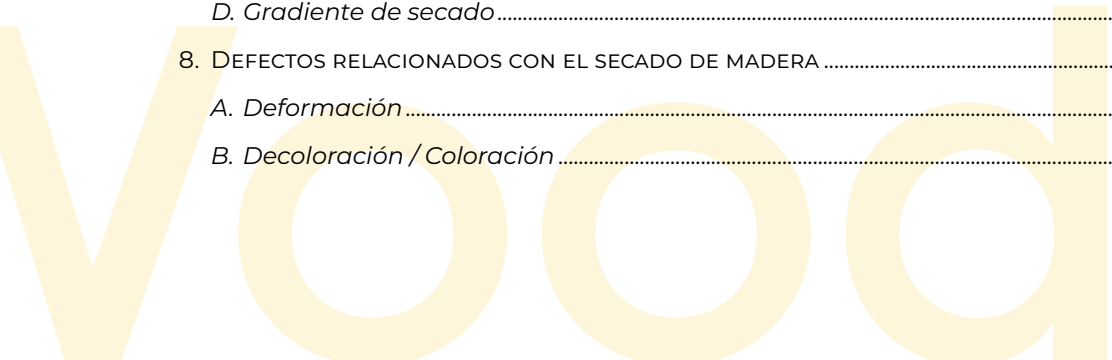






Índice

¿CÓMO CONSEGUIR UN SECADO DE CALIDAD ?	11
INTRODUCCIÓN.....	13
I - RECURRIR AL SECADO, UN IMPERATIVO.....	15
1. ¿POR QUÉ RECURRIMOS AL SECADO?	15
2. DOS MÉTODOS PARA SECAR MADERA.....	16
II- LA MADERA, CONSTITUÍDA POR AGUA Y RODEADA DE AIRE.....	17
1. LOS TRES FUNDAMENTOS DE LA MADERA.....	17
2. EL AGUA EN LA MADERA	20
A. Tipos de agua.....	20
B. Indicador de referencia	21
3. MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DE LA MADERA:.....	22
A. Dos formas posibles de medirla	22
B. Correcta elección del higrómetro	23
C. Cálculo por los el método eléctrico del gradiente de humedad Gh	24
D. ¿Cuál es el índice de humedad de mi madera?	24
D. Recepción de madera ya presecada	26
F. Ventajas e inconvenientes	27
G. Precisiones técnicas sobre los higrómetros.....	27
H. Algunos errores encontrados con frecuencia	27
4. EQUILIBRIO HIGROSCÓPICO DE LA MADERA	28
A. ¿Qué es la humedad de equilibrio?.....	28
B. La humedad de equilibrio: una variable importante.....	29
5. ÍNDICE DE HUMEDAD DE MADERA EN SERVICIO	31
6. CONTRACCIÓN Y COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN	32
A. Contracción.....	32
B. Coeficiente de contracción.....	33
C. Cálculo de la contracción	33
7. MECANISMOS DE SECADO.....	34
A. Dos fenómenos importantes: la circulación y la evaporación	34
B. Sentido de migración del agua.....	34
C. Factores que influyen en los mecanismos de secado.....	35
D. Gradiente de secado.....	35
8. DEFECTOS RELACIONADOS CON EL SECADO DE MADERA	36
A. Deformación	36
B. Decoloración / Coloración	36



C. Azulado.....	37
D. Fendas.....	37
E. Colapso (Roble).....	38
9. CONTROLAR LA HUMEDAD RELATIVA DESPUÉS DEL SECADO ES CONTROLAR LOS DEFECTOS.....	39

III - SECADO AL AIRE LIBRE 41

1. ENRASTRELADO Y APILADO PARA EL SECADO AL AIRE LIBRE.....	41
A. Características de los rastreles.....	41
B. Área de almacenamiento.....	42
C. Distribución y orientación de las pilas.....	42
D. Fecha de apilado y tiempos de secado.....	43
2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL SECADO AL AIRE LIBRE.....	44

IV - SECADO EN CÁMARA..... 45

1. ELEMENTOS DE UNA CÁMARA DE SECADO.....	45
2. PRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS QUE EXISTEN.....	45
A. Secado con sistemas de aire acondicionado caliente llamado también «tradicional».....	45
B. Secado por deshumidificación por bomba de calor.....	46
C. Secado al vacío.....	48
3. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SECADO SEGÚN DIFERENTES CRITERIOS.....	49
4. APILADO Y ENRASTRELADO PARA EL SECADO TÉRMICO.....	50
A. Preámbulo.....	50
B. Tipos y dimensiones de los rastreles.....	50
C. Ejemplos de buenos y malos apilados.....	51
5. OPERACIONES PREVIAS AL LLENADO DEL SECADERO.....	52
6. COLOCACIÓN DE LOS PAQUETES EN LA CÁMARA DE SECADO.....	52
7. CICLOS DE SECADO.....	55
8. TABLAS DE SECADO.....	56
9. MANEJO DEL SECADO.....	57
10. ALMACENAMIENTO POSTSECADO.....	58

V - EL SECADO DE ESPECIES PIRENAICAS 59

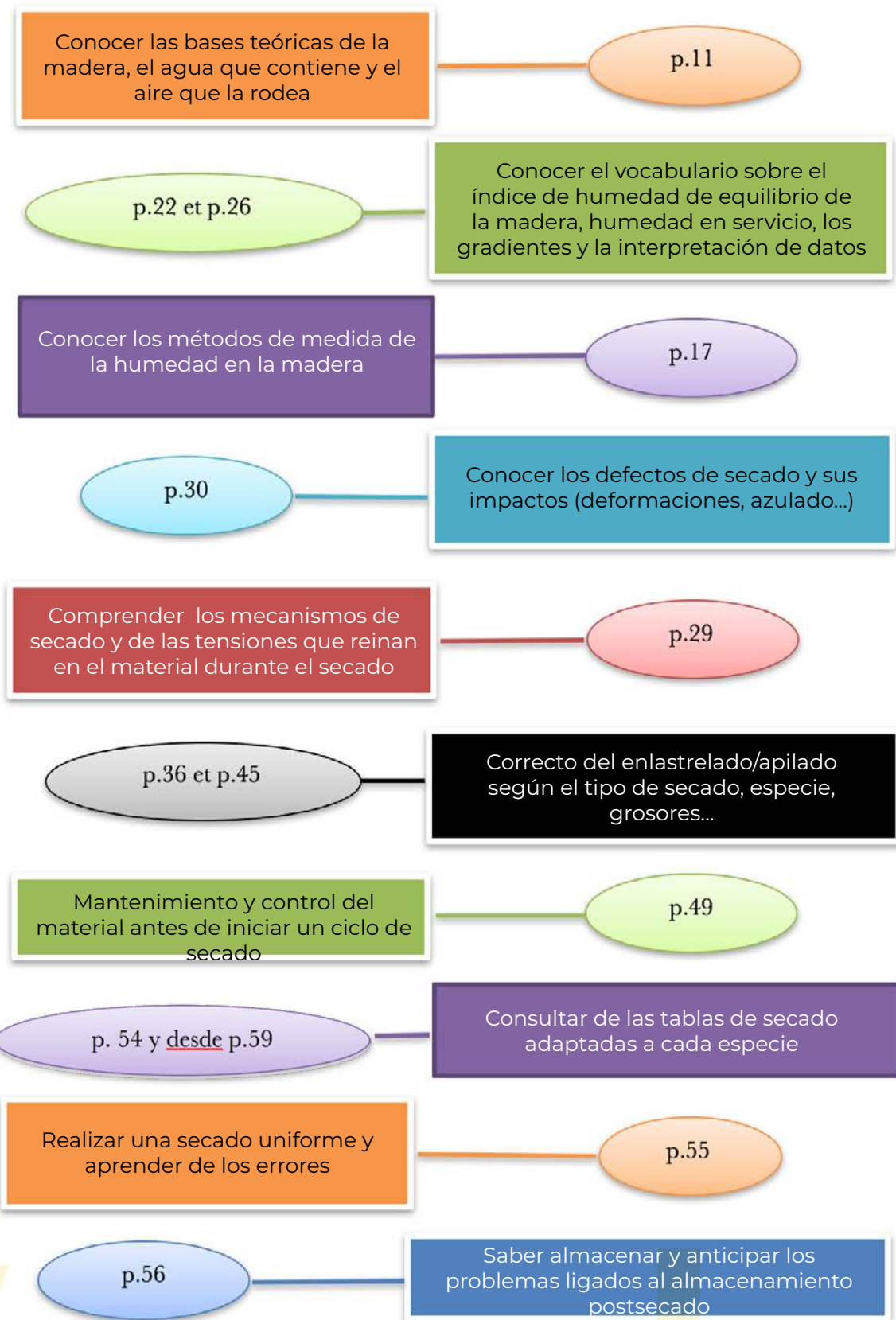
1. PREÁMBULO.....	59
2. NOTAS.....	59
3. ROBLE DE LOS PIRINEOS.....	60
A. Propiedades físicas y mecánicas del roble.....	60
B. Propiedades relativas al secado del roble de los Pirineos.....	60
C. Tabla de secado del roble de los Pirineos (grosor de 27 a 35 mm).....	61
D. Explicación para el roble de los Pirineos.....	61
4. HAYA.....	62
A. Propiedades físicas y mecánicas del haya.....	62



B. <i>Propiedades relativas al secado del haya</i>	63
C. <i>Tabla de secado del haya (grosor de 27 a 35 mm)</i>	63
5. ABETO	63
A. <i>Propiedades físicas y mecánicas del abeto</i>	64
B. <i>Propiedades relativas al secado del abeto</i>	64
C. <i>Tabla de secado del abeto (grosor de 27 a 35 mm)</i>	65
D. <i>Explicación para el abeto</i>	65
6. PINO SILVESTRE.....	65
A. <i>Propiedades físicas y mecánicas del pino silvestre</i>	66
B. <i>Propiedades relativas al secado del pino silvestre</i>	66
C. <i>Tabla de secado del pino silvestre (grosor de 27 a 35 mm)</i>	67
7. PINO RADIATA	67
A. <i>Propiedades físicas y mecánicas del pino radiata</i>	67
B. <i>Tabla de secado del pino radiata (grosor de 27 a 35 mm)</i>	68
8. PINO NEGRO	68
A. <i>Propiedades físicas y mecánicas del pino negro</i>	69
B. <i>Nuestros consejos para la tabla de secado del pino negro</i>	71
VI - RESUMEN DE BUENAS PRÁCTICAS Y NUESTROS CONSEJOS.....	71
1. <i>MEDICIÓN DE LA HUMEDAD</i>	71
2. <i>APILADO Y ENRASTRELADO</i>	71
3. <i>ANTES DE LLENAR EL SECADERO</i>	72
4. <i>REALIZACIÓN DEL SECADO</i>	73
5. <i>DESPUÉS DEL SECADO</i>	73
6. <i>INCIDENTES Y PROBLEMAS DE FUNCIONAMIENTO</i>	74
7. <i>CONSEJOS Y MANTENIMIENTO</i>	74
VII - TABLA DE HUMEDADES DE EQUILIBRIO.....	75
VIII - TERMINOLOGÍA.....	77
IX - BIBLIOGRAFÍA	79
X - ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	81
XI - ÍNDICE DE TABLAS.....	83
XII - PARTICIPANTES DEL PROYECTO IFORWOOD	85
XIII - ANEXOS	87



¿Cómo conseguir un secado de calidad ?







Introducción

El secado de la madera es una etapa esencial en la transformación de este material porque le confiere las características indispensables para utilizarla de forma correcta, para que tenga un buen rendimiento, estabilidad dimensional, mejora de las características mecánicas, conservación frente a algunos agentes de alteración biológica, preparación para el encolado y para recibir acabados.

Hoy en día, los sectores de la primera¹ y segunda² transformación de la madera han de reconocer la importancia que el secado tiene en sus actividades. Al final de la cadena de transformación de la madera, los productos terminados tienen que tener una humedad media de equilibrio en relación con su uso y tienen que condicionarse en función del lugar en el que se van a utilizar con el fin de minimizar las variaciones dimensionales a lo largo del tiempo.

En una estrategia empresarial de liderazgo de mercado y de optimización de salidas comerciales, el dominio del proceso de secado puede aportar un gran valor añadido a las empresas. En la actualidad, ese dominio del secado se ha convertido en algo necesario debido a la fuerte demanda de madera con altos niveles de exigencia. Ahora mismo, la oferta pirenaica no puede responder a esta demanda por las siguientes razones:

- **Todavía hay pocos secaderos en los Pirineos.**
- **Los secaderos disponibles no se utilizan al máximo de su potencial.**

Esto nos ha llevado a la situación actual donde «la madera pirenaica es poco aprovechable por la industria de segunda transformación», siendo únicamente una parte del problema la cuestiones técnicas.

De hecho, si tenemos en cuenta las especificidades de la madera de montaña y en particular la de los Pirineos, no es posible aplicarles los estándares técnicos del proceso de secado para llegar a los resultados esperados. Por tanto, es necesario definir una guía técnica propia de las maderas pirenaicas.

El objetivo de esta guía es aportar respuestas a los agentes del sector sobre los problemas del secado de especies pirenaicas y en concreto estas seis:

- **Roble.**
- **Abeto.**
- **Pino Radiata.**
- **Haya.**
- **Pino silvestre.**
- **Pino negro.**

Aunque esta guía está pensada para mejorar las técnicas de secado de estas 6 especies, no deja de ser importante recordar a los expertos o informar a las personas interesadas de los conocimientos básicos, las metodologías y prácticas del secado de madera.

¹Primera transformación de la madera: Incluye el conjunto de actividades de transformación de la madera en rollo y de los restos de la madera al aserrarla (cortado en paralelo, madera aserrada, tablas, frisos), desenrollado (hojas de chapa), trituración (pasta destinada a la fabricación de papel) y prensado (paneles).

²Segunda transformación de la madera: Aporta valor añadido a los productos procedentes de la primera transformación y los pone a disposición y uso directo del consumidor.





I- Recurrir al secado, un imperativo

1. ¿Por qué recurrimos al secado?

Ya en el siglo XVIII, Henri-Louis DUHAMEL DU MONCEAU, famoso agrónomo y botánico apuntaba:



«Hemos visto que la madera se tuerce y se resquebraja mientras se seca; de ahí podemos concluir que para los trabajos que exigen precisión, es necesario que las maderas estén bien secas antes de trabajarlas; sin esta prevención, el montaje de trabajos en madera se resentirá, se curvará, y como si el montaje se deshiciese, las juntas se abrirán, de tal forma que el trabajo se sumirá en el desorden.»

Henri-Louis DUHAMEL DU MONCEAU, agrónomo y botánico del siglo XVIII (Tardieu)

También añadió: «Otro inconveniente que le sucede a las piezas que trabajamos cuando la madera está todavía verde es que se pliegan sobre la carga y se curvan. Por tanto, no hay duda de que en la medida de lo posible se debe emplear madera seca, bien para los trabajos de carpintería, para que no se tuerza la madera; bien para las estructuras, principalmente cuando las piezas no deben ser visibles.»

La madera es un material higroscópico susceptible de absorber o perder agua en función de las condiciones en las que se encuentre. Las variaciones en el índice de humedad modifican la mayoría de las características de la madera y por debajo de un umbral determinado, dichas variaciones van acompañadas de variaciones dimensionales.

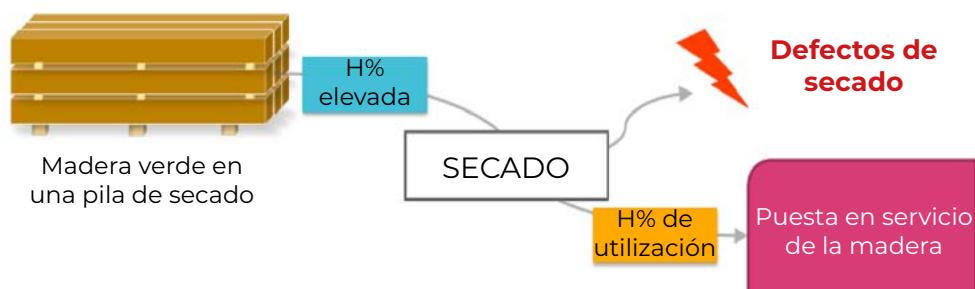
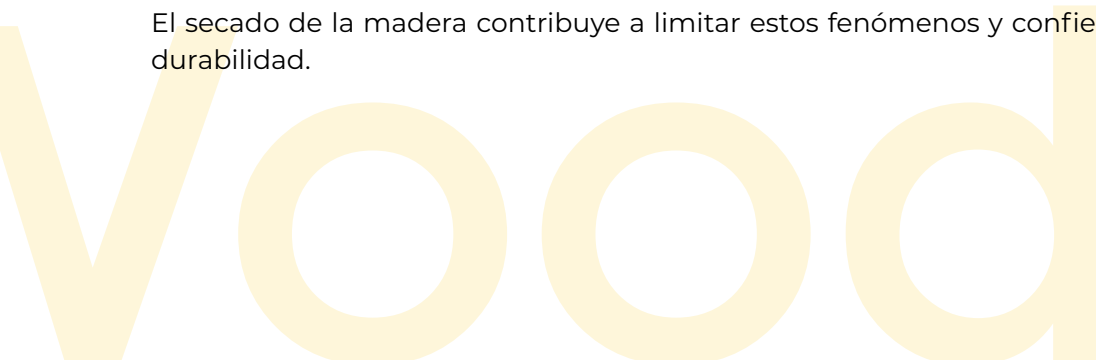



Figura 1: Proceso simplificado de secado (CRITTBois, 2018)

El carácter higroscópico de la madera genera tres tipos de restricciones:

- Ataques de insectos y hongos.
- Singularidades en la madera (mermas, fendas, deformaciones...).
- Dificultades de transformación y de empleo de productos (mecanizado, encolado, aplicación de acabados).

El secado de la madera contribuye a limitar estos fenómenos y confiere a la madera una cierta durabilidad.





Por tanto, vemos que el **secado** es una operación **imprescindible** en el proceso de transformación de la madera. Durante la transformación, la madera es susceptible de sufrir defectos incontrolables que impedirían su posterior uso. Además, el secado de la madera permite ahorrar en lo que se refiere al transporte debido a que se reduce la masa. Un buen número de aplicaciones de la madera necesitan una humedad en la madera que no se puede alcanzar si se deja al aire libre. Por tanto, está clara la necesidad de secar artificialmente la madera siempre y cuando la calidad y su fin lo justifiquen.

2. Dos métodos para secar madera

¿En qué consiste el secado? Se trata de quitar toda o una parte del agua contenida en un producto. Hay dos vías principales para alcanzar este objetivo:

- Extracción mecánica: el agua sale del producto en estado líquido. La gravedad puede ser suficiente para una parte del agua, pero se requiere una acción más contundente que implique el aumento de las fuerzas volumétricas (secado centrífugo) o la deformación por compresión del producto (prensado).
- Secado térmico: consiste en suministrar la energía necesaria para la evaporación del agua y retirar el vapor de agua resultante.

La vía mecánica no se utiliza en la madera porque el prensado no se usa de manera industrial por las dimensiones de la madera y por los volúmenes utilizados. Por esta razón, solo se emplea el secado térmico. A continuación, comentamos dos métodos:

1. Secado al aire libre.

2. Secado artificial.

Comentario:

Muy a menudo utilizamos la expresión «secado natural» para referirnos al secado al aire libre por contraposición al secado artificial. Esta expresión hace pensar que el secado debe efectuarse «completamente solo», naturalmente, sin ninguna intervención. Sin embargo, no debe ser así. La práctica demuestra que una buena calidad en el secado se obtiene a cambio de realizar una serie de operaciones que se repiten con regularidad. En las páginas de esta guía veremos esas operaciones.

Antes de desgranar de manera más precisa el secado al aire libre y el artificial, primero vamos a tratar los aspectos teóricos fundamentales que le permitirán secar correctamente la madera. Efectivamente, los problemas referidos al secado de madera en Francia no se pueden achacar solo a un problema de mercado. Francia y Occitania no son una excepción, la falta de habilidades relacionadas con los fenómenos de secado y el vocabulario empleado por el sector de la industria, los clientes y los proveedores son fuentes de secados mal ejecutados.

¿Tiene un secadero? ¿Consume o compra madera seca? ¿Sus clientes están satisfechos con sus productos, pero les hubiera gustado adquirir madera seca? En estos tres casos concretos, hay que recordar los fundamentos de secado, las características de la madera, la cantidad de agua en la madera, del aire que la rodea, etc. A continuación desgranamos las competencias que hay adquirir obligatoriamente.



II. La madera, constituida por agua y rodeada de aire.

1. Los tres fundamentos de la madera

La madera se define industrialmente como un material «fabricado» dentro del árbol que se constituye en torno a un eje. La tala del árbol revela la sección o superficie transversal.



Figura 2: Sección transversal del árbol (CRITTBois Occitanie)

Al observar desde más cerca la sección transversal, vemos un material no homogéneo con diferentes capas más o menos diferencias dependiendo de la especie.

Descripciones:

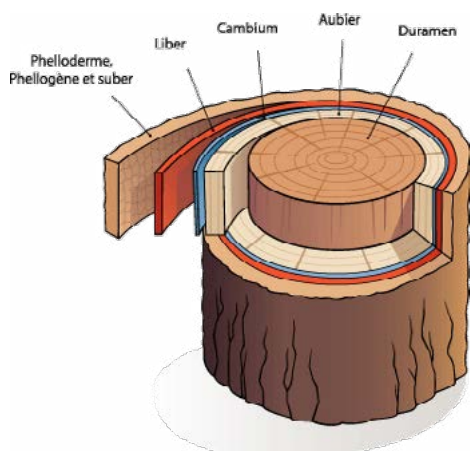


Figura 3: Sección transversal del árbol (ART LEVAGE)

Corteza (Corteza externa): Capa protectora del árbol formada de tejido vegetal. Es la parte que podemos tocar.

Líber (Corteza interna): Tejido vegetal secundario producido por el cambium, los tallos y las raíces. Conduce la savia elaborada.

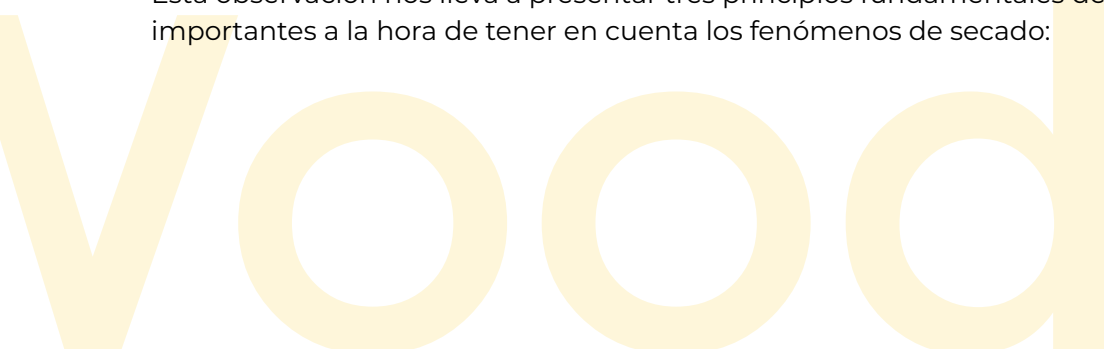
Cambium: Capa muy fina por donde circula la savia. Es la parte viva del árbol puesto que aquí se fabrican las fibras, los anillos y la corteza.

Albura (Madera funcional): Parte funcional del árbol que corresponde a las zonas de crecimiento formadas más recientemente y que contienen células vivas.

Duramen (Madera perfecta): Parte muerta donde se acumulan los residuos metabólicos y a donde no llega la savia. Es el esqueleto del árbol.

Radios: Son células radiales, en el centro los anillos son más oscuros. Constituyen uno de los elementos de menor resistencia que favorecen las fendas en el secado y el rajado (duelas).

Esta observación nos lleva a presentar tres principios fundamentales de la madera muy importantes a la hora de tener en cuenta los fenómenos de secado:





❖ La madera es un material higroscópico

La madera es un material **higroscópico** (como las esponjas); es decir, puede perder o absorber agua. Esté en el estado que sea (verde, seca, reseca, almacenada o utilizada en algún producto) siempre estará perdiendo o recuperando agua en función de las condiciones climáticas del lugar en que se encuentre. La higroscopia de la madera es muy importante por su influencia en las dimensiones y en la forma de las piezas de madera, la densidad del material, la resistencia mecánica a trabajar la madera, su durabilidad y las alteraciones que pueda sufrir su conductividad eléctrica, sonora, térmica...

❖ La madera es un material heterogéneo³

La madera es un material **heterogéneo** compuesto de elementos (tejidos) de diferente naturaleza. Nosotros nos referimos al «Plan leñoso» (Norma NF B 50-002 [Francia]). Existe una gran variabilidad entre una especie y otra en cuanto a las dimensiones, la forma, la distribución, el número y el color de los radios leñosos. Las células se organizan paralela o perpendicularmente al eje del tronco. De esta forma, podemos distinguir en la madera tres direcciones:

- La dirección **axial** sigue a lo largo del tronco, es la dirección del eje de simetría del cilindro.
- La dirección **radial** sigue los radios incluidos en una sección recta del cilindro.
- La dirección **tangencial** es perpendicular a la dirección radial y tangente a los anillos de crecimiento.

❖ La madera es un material anisótropo⁴

La madera es un material **anisótropo**, lo que es una consecuencia directa de su heterogeneidad. La madera es anisótropa porque sus elementos constitutivos están orientados en varias direcciones determinadas. Como resultado, las propiedades mecánicas y físicas de la madera no son las mismas en todos los planos (longitudinal, radial y tangencial). El carácter anisótropo está del mismo modo vinculado a las siguientes particularidades:

- Deterioro de las fibras de la madera.
- Presencia de madera juvenil y adulta.
- Presencia de madera de compresión y madera de tracción.
- Presencia de mermas en el crecimiento.
- Presencia de defectos y alteraciones.

³ Heterogéneo: Dicho de sustancias cuyas propiedades físicas varían según la dirección.

⁴ Anisótropo: Dícese de las sustancias cuyas propiedades físicas varían en función de la dirección.



Recordemos:

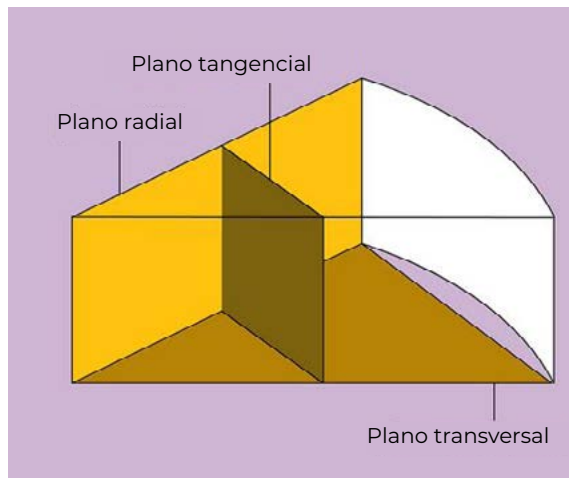
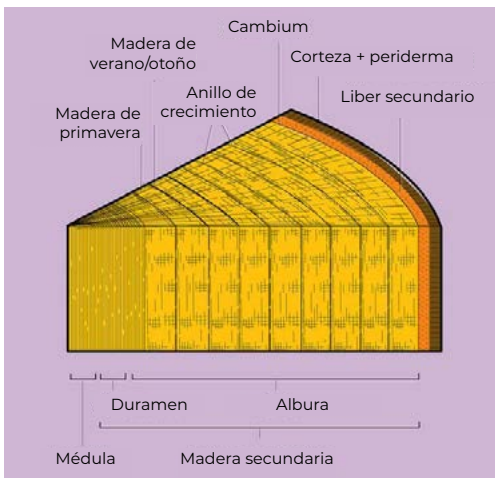
1



La madera es un material **higroscópico** susceptible de perder o absorber agua en función de las condiciones en las que se encuentre.

(Le sourire d'Isis) (La sonrisa de Isis)

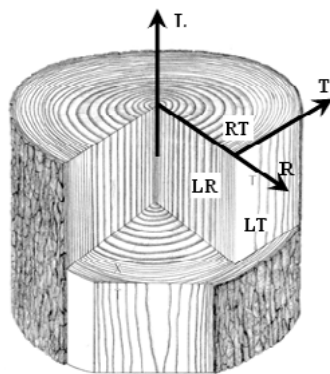
La madera es un material **heterogéneo** ya que está compuesto de elementos (tejidos) de diferente naturaleza. «Plan leñoso» (Norma NF B 50-002 [Francia]).



2

(Édouard BOUREAU, 2018)

3



(Moutee, 2006)

La madera es un material **anisótropo** porque no tiene las mismas propiedades en todas sus direcciones.

2. El agua en la madera

El agua que contiene la madera influye sobre las siguientes características:

- Densidad.
- Dimensiones.
- Características mecánicas.
- Características físicas.
- Aptitud para ser trabajada o encolada.
- Aptitud para recibir acabados.
- Resistencia a los ataques biológicos.

A. Tipos de agua

Podemos encontrar el agua bajo diversas formas en la madera (véase la figura 4):

Agua libre (también llamada agua capilar): Se aloja en el lumen celular. Se puede extraer sin provocar variación dimensional. Cuando la madera se seca, el agua libre es la primera en salir.

Agua de impregnación (también llamada agua higroscópica): Impregna la pared celular. Al extraer el agua de impregnación se producen variaciones dimensionales (por debajo del 30% de humedad).

Agua de constitución: Parte integrante de la materia. No se puede extraer a lo largo del secado.

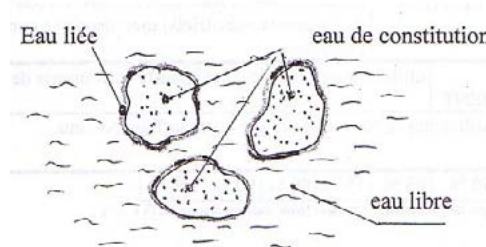


Figura 4: Tipos de agua en la madera (GénieCVL)

Nota: Cuando la madera verde se seca hasta un punto dado, el agua que sale primero es el agua libre sin producir variaciones dimensionales.

Después llega un momento en el que la totalidad del agua libre ha salido de la madera pero queda todavía toda el agua de impregnación; es decir, las paredes celulares todavía están saturadas de humedad. La madera alcanza entonces el **Punto de saturación de fibras (PSF)**. El Punto de saturación de fibras puede variar con la especie de madera y la temperatura. Sin embargo, a 20 °C el Punto de saturación de fibras se sitúa siempre cerca del **30%**. Por debajo del Punto de saturación de fibras las variaciones de humedad vienen acompañadas de variaciones dimensionales.



Secar la madera consiste en retirar toda el agua libre y una parte del agua de impregnación.

	Madera anhidra	PSF
Agua de constitución	Agua de constitución + Agua de impregnación	Agua de constitución + Agua de impregnación + Agua libre
	0%	30%

Figura 5: Esquema de las diferentes tipologías de agua en la madera (CRITTBois, 2018)

B. Indicador de referencia

Para referirnos a la humedad que hay en la madera, utilizamos habitualmente muchos términos. Sin embargo, el mejor indicador para determinar la cantidad de agua en la madera es el índice de **humedad en base anhidra**.



Figura 6: Identificación del indicador de referencia: índice de humedad en base anhidra (CRITTBois, 2018)

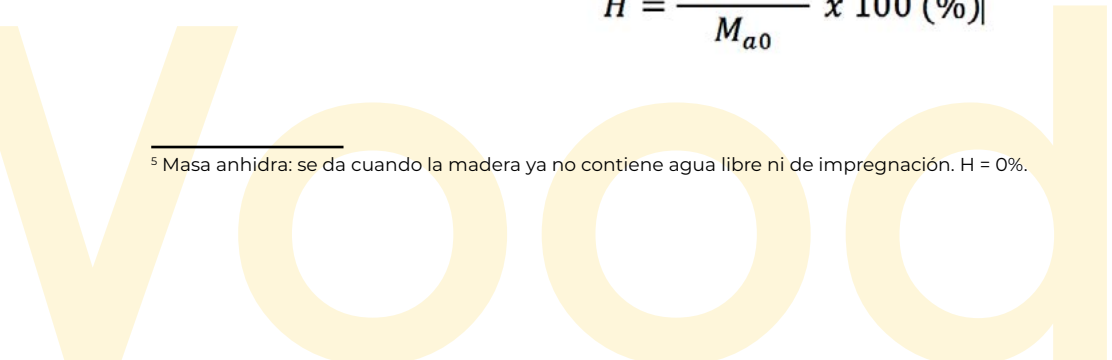
Índice de humedad en base anhidra, o más comúnmente llamado índice de humedad (término utilizado a partir de ahora en la guía) representa la relación entre la masa de agua y la masa de madera anhidra. Llamaremos a este índice H, se expresa como porcentaje (%) y se formula así:

$$H = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa anhidra}^5} \times 100 (\%) \text{ lo que equivale a decir}$$

$$H = \frac{M_{\text{húmeda}} - M_{\text{anhidra}}}{M_{\text{anhidra}}} \times 100 (\%) \text{ o también}$$

$$H = \frac{M_h - M_0}{M_{a0}} \times 100 (\%)$$

⁵ Masa anhidra: se da cuando la madera ya no contiene agua libre ni de impregnación. H = 0%.



Pour information (ne pas confondre) :

Humedad:

1. Contenido de agua del suelo, de la atmósfera.
2. Característica de aquello que está húmedo, ligeramente mojado o infiltrado con agua, de un líquido.
3. Característica de un clima, de una región o la atmósfera está cargada de agua.

Sequedad:

Cualidad de algo que está seco. $S = \frac{M_{anhydre}}{M_{brut}}$ (Inverso al índice de humedad).

Higrometría (sinónimo de higroscopia):

Rama de la meteorología que estudia la cantidad de vapor de agua en el aire.

Índice de humedad en base húmeda: Es la relación entre la masa de agua y la masa total de madera.

Usado en biocombustibles en referencia al poder calorífico y se expresa así: $H = \frac{M_{humide} - M_{anhydre}}{M_{humide}} \times 100 (\%)$.

Definiciones extraídas del diccionario Larousse

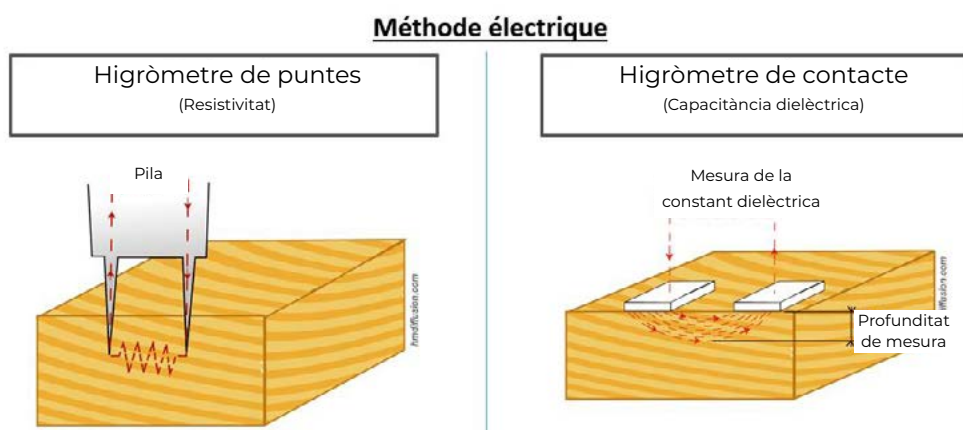
3. Medición de la humedad de la madera:

A. Dos formas posibles de medirla

Hay dos formas de medirla y están regidas por dos normas europeas:

- La medida por pesada y secado (NF EN 13183-1⁶).
- La medida por métodos eléctricos (NF EN 13183-2⁷).

❖ Método eléctrico



Clavar a la fusta perpendicularment a la fibra a la profunditat desitjada. Els dos electrodes poden estar aïllats o no als seus extrems.

Figura 7: Detalles del método por medida eléctrica (CRITBois, 2018)

⁶ «Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa».

⁷ «Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica».



El higrómetro de puntas es en realidad un ohmímetro, ya que mide la resistencia eléctrica de la madera que varía en función de la humedad. La resistencia aumenta a medida que la humedad de la madera desciende. Procuraremos con este tipo de higrómetro utilizar electrodos (puntas) aislados eléctricamente hasta su extremidad con el objetivo de medir el reparto de la humedad a lo largo del espesor de la madera. Lo haremos clavando las puntas a diferentes profundidades.

El higrómetro de contacto efectúa una medida que llamamos «capacitiva» en contraposición a la que hace el higrómetro de puntas, llamada «de resistencia». Este higrómetro de contacto se aplica sobre la superficie de la pieza de madera. No hay que clavar los electrodos. Mide la humedad «global» del espesor de la muestra.

Atención: Los higrómetros de contacto sirven para medir la humedad de una pieza fina de madera aserrada, mientras que los otros sirven para medir la humedad de maderas más gruesas. La incorrecta utilización del higrómetro conducirá a resultados obligatoriamente erróneos. Por favor, lean las instrucciones de los aparatos.

En el anexo 1 encontrarán una ficha explicativa del método eléctrico propuesta por CRITBois Occitanie. (P. 87)

❖ Método por pesada y secado

En cuanto al primer método, la medida por pesada y secado, consiste en cortar de una pieza de madera una muestra perpendicularmente a las fibras de la madera, pesarla a una humedad H_1 dada y después poner la muestra en una estufa de secado a $103\text{ °C} (\pm 2\text{ °C})$ durante al menos 24h. Pesaremos la muestra cada 2h.

Cuando en dos pesadas consecutivas se obtenga la misma masa, la muestra habrá alcanzado el estado anhidro ($H=0\%$). Para obtener el índice de humedad en base anhidra solo hay que aplicar la siguiente fórmula:

$$H (\%) = \frac{M_{humide} - M_{anhydre}}{M_{anhydre}} \times 100 (\%)$$

En el anexo 2 encontrarán una ficha explicativa del método por pesada propuesta por CRITBois Occitanie. (P.88)

NOTA: También hay sondas en los secaderos que utilizan el método de medida resistiva.

B. Correcta elección del higrómetro

Las funciones y restricciones principales que hay que tener en cuenta para la elección de un higrómetro son las siguientes:

Funciones del higrómetro: Precisión, rango de medida, variedad de especies de madera, registro, visualización y transferencia de datos.

Restricciones: Autonomía, temperatura de utilización, carga, impermeabilidad y comodidad para desplazarlo de un sitio a otro y precio.

C. Cálculo por los el método eléctrico del gradiente de humedad G_h

Desde que la madera empieza a secarse, hay diferencias en la humedad a lo largo del grosor de la madera, que son mayores cuanto más gruesa sea la madera. La relación entre la humedad en el corazón de la madera y la de la superficie es el gradiente de humedad (véase la figura 8).

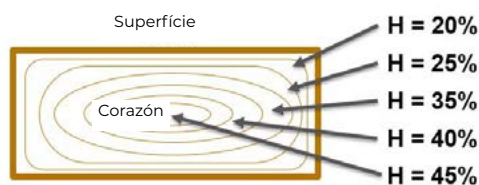


Figura 8: Ilustración del gradiente de humedad en una pieza de madera (CRITTBois, 2018)

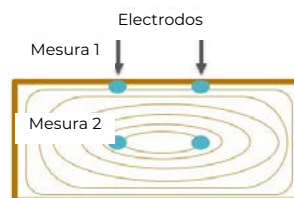


Figura 9: Medida de la humedad con un higrómetro de puntas (CRITTBois, 2018)

En la práctica, medimos el gradiente de humedad sacando la relación entre el valor obtenido por los electrodos del higrómetro cuyas puntas agujas se han clavado en el corazón de la pieza y el valor obtenido por el higrómetro cuando las puntas se han clavado a unos milímetros de la superficie (véase más arriba la figura 9).

El gradiente de humedad nos informa sobre las posibles tensiones que puede haber en el interior de la pieza de madera. Cuanto mayor sea el gradiente de humedad; eso es cuando hay una mayor diferencia entre la humedad en el corazón de la pieza y la de la superficie, la madera se secará más rápido. Al contrario, cuando menor sea el gradiente, la madera se secará más despacio. Con un gradiente de humedad elevado tendremos más posibilidades de que surjan defectos durante el secado.

El gradiente de humedad (G_h) se expresa así:

$$G_h(\%) = \frac{H_{c\text{œ}ur}(\%)}{H_{s\text{ur}f\text{a}c\text{e}}(\%)}$$

D. ¿Cuál es el índice de humedad de mi madera?

«Medí el índice de humedad con el higrómetro de puntas de algunas tablas de roble; el índice de las tablas de la partida recibida estaba entre el 45% y el 63%. Así lo notifiqué en la ficha de control de descarga».

Esta frase la hemos escuchado alguna vez; sin embargo, no tiene mucho significado. ¿Por qué? En primer lugar, nunca hay que medir por métodos eléctricos (higrómetro de puntas o de contacto) el índice de humedad en anhidro de piezas cuya humedad es superior al 35%. Solo puede utilizarse el método por pesada y deshidratación. Después, incluso si el índice de humedad está entre el 15% y el 18%, hay que mencionar algunas precisiones complementarias.

En realidad, para conseguir una buena interpretación del contenido de humedad de un palé de madera de un mismo tipo, hay que recabar varios datos que podemos presentar en la siguiente tabla:



Fecha de recepción / Fin de ciclo	Espesor especie (mm)	Humedad requerida (%)	Fecha	Tª madera (°C)	Mues.1 Corazón (%)	Mues. 1 Superficie (%)	Mues. 2 Corazón (%)	Mues.2 Superficie (%)
Fecha 1	Nº xx mm	H (%)	Fecha 2	T	H1c	H1s	H2c	H2s

$$H1c \text{ moyen} = \frac{H1c + H2c}{2}; H2s \text{ moyen} = \frac{H1s + H2s}{2};$$

$$G_{h1} = \frac{H1c}{H1s}; G_{h2} = \frac{H2c}{H2s}; G_h = \frac{G_{h1} + G_{h2}}{2} \text{ ou}$$

Interpretación: El lote **X-xx** mm, que sale del ciclo Fecha de recepción / Fin de ciclo a **Fecha 1**, con una humedad requerida del **H (%)**, un índice de humedad medio en el corazón de **H1c medio**, un índice de humedad medio en la superficie de **H2s medio** y teniendo un gradiente de humedad de **G_h**, obtenemos como conclusión una falta de homogeneidad / una buena homogeneidad...

❖ Ejemplo 1

Fecha recepción	Espesor especie (mm)	Humedad requerida (%)	Fecha	Tª madera (°C)	Ech.1 Corazón (%)	M.1 Superficie (%)	M.2 Corazón (%)	M.2 Superficie (%)
13/05	Chêne 27mm	8%	14/05	20°C	8,6	8,1	8,3	7,9

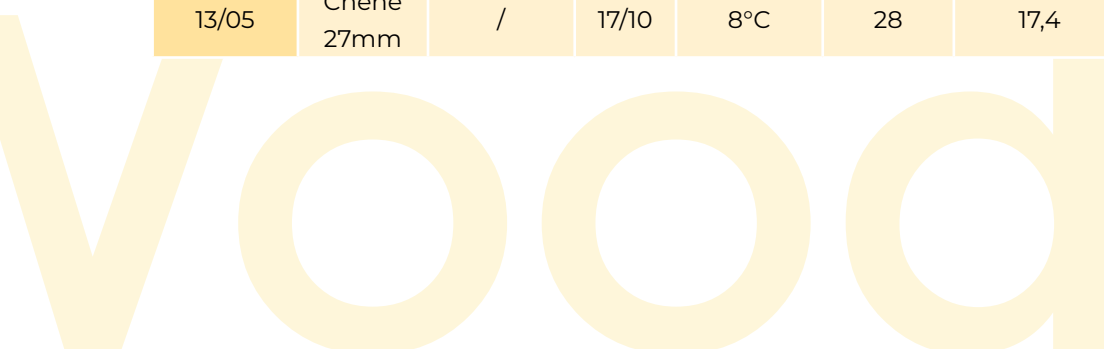
$$H1c \text{ moyen} = \frac{H1c + H2c}{2}; H2s \text{ moyen} = \frac{H1s + H2s}{2};$$

$$G_{h1} = \frac{H1c}{H1s}; G_{h2} = \frac{H2c}{H2s}; G_h = \frac{G_{h1} + G_{h2}}{2} \text{ ou}$$

Interpretación: El lote **Roble-27** mm, que sale del ciclo de secado a **13/05**, con una humedad requerida del **8%**, con un índice de humedad medio en el corazón de **8,45%**, un índice de humedad medio en la superficie de **8,00%** y teniendo un gradiente de humedad de **1,055**; obtenemos como conclusión una buena homogeneidad...

❖ Ejemplo 2

Fecha recepción	Espesor especie (mm)	Humedad requerida (%)	Fecha	Tª madera (°C)	M.1 Corazón	M.1 Superficie	M.2 Corazón	M.2 Superficie
13/05	Chêne 27mm	/	17/10	8°C	28	17,4	44	22





Interpretación: El lote **Roble-27** mm, recibido el **13/05**, con una tasa de humedad media en el corazón del **36%**, una tasa de humedad media en la superficie de **19,70%** y con un gradiente de humedad de **1,805**; llegamos a la conclusión una mala homogeneidad... Hay que señalar que la medida en el corazón es muy incierta puesto que el aparato registra un valor superior al 28% de humedad.

E. Recepción de madera ya presecada

Hoy en día, algunas empresas encargan madera con un índice de humedad entre el 15% y el 18% y después ellos la secan de nuevo para alcanzar un índice del 10%. Este es el caso concreto de algunas empresas de carpintería. Para estos casos aconsejamos controlar bien los palés que se reciben. Para ello, se puede rellenar una ficha de control o verificación del pedido recibido y compararlo con el pedido inicial que se hizo o si se han cumplido las especificaciones que se hubieren hecho. El objetivo es comprobar las distintas dimensiones de las planchas, la altura de las pilas, espacio entre las capas, los índice de humedad en corazón y superficie, la homogeneidad del primer secado... Cuando controlamos un palé o lote al recibirlo, nos informaremos de la homogeneidad del secado, la calidad del apilado y sobre todo, podemos establecer un seguimiento a lo largo de las estaciones del año para conseguir nuestra propia experiencia acerca del impacto de las diferencias entre proveedores, las variaciones climáticas o las diferencias ligadas al origen de la madera. También se podrá verificar si las especificaciones que se habían pedido se han cumplido y afinar los programas de secado para adaptarlos a las características de los palés recibidos.

En el anexo 3 encontrarán una ficha de este tipo propuesta por CRITTBois Occitanie. (P. 89)



F. Ventajas e inconvenientes

La tabla 8 compara los métodos de medida según sus ventajas e inconvenientes:

Tabla 1: Ventajas e inconvenientes de los diferentes métodos de medida

Método	Ventaja	Inconveniente
Método por pesada y deshidratación	Exactitud porque aplica la definición de humedad (Precisión del 0,1% de humedad) importa poco el rango de humedad	Proceso largo para llegar al resultado Método destructivo
Método eléctrico con higrómetro de puntas	Medida rápida Método no destructivo	Necesita varias mediciones para conseguir la humedad global Se necesita ajustar la temperatura de la madera (Precisión del 1 al 2% de humedad en el intervalo 6% - 35%)
Método eléctrico con higrómetro de contacto	Medida rápida Método no destructivo Insensibilidad a la temperatura Funciona a través del barniz y la pintura	No apropiado para espesores > 10 mm Se necesita ajustar la densidad Uso aconsejado para madera cepillada (necesita contacto «delicado») (Precisión del 1 al 2% de humedad en el intervalo 6% - 35%)

G. Precisiones técnicas sobre los higrómetros

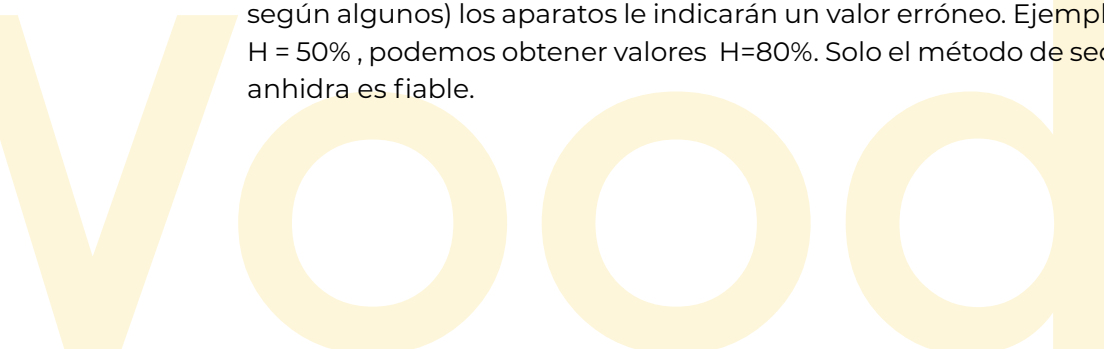
Estos aparatos son válidos si la lectura que se hace de ellos se corrige en función de:

- La temperatura de la madera: una incremento de la temperatura entraña una disminución de la resistividad de la madera anhidra.
- Del tipo y densidad de la madera: tenga en cuenta los grupos (véase el Manual de uso).
- La dirección de la medida: la madera es de dos a tres veces menos resistente en el sentido longitudinal que en el radial o tangencial. En general, los aparatos están calibrados para hacer mediciones perpendiculares a las fibras.
- De la profundidad a la que medimos la humedad (atención con los electrodos no aislados).

H. Algunos errores encontrados con frecuencia

A menudo encontramos errores por falta de información o desconocimiento del material. Por tanto, recordamos algunos aspectos que hay que saber:

- Es imposible medir la madera verde por métodos eléctricos. Más allá del 28% (hasta el 35% según algunos) los aparatos le indicarán un valor erróneo. Ejemplo: con una humedad real $H = 50\%$, podemos obtener valores $H=80\%$. Solo el método de secado y pesado de la masa anhidra es fiable.



- Los electrodos no aislados clavados en la madera a 2 cm de profundidad nos darán un índice de humedad correspondiente a la parte del material donde el índice sea más alto y no necesariamente la humedad a 2 cm de profundidad, especialmente si la madera está húmeda en la superficie. ¡Es así por el hecho de que la electricidad siempre va por el camino más corto! Se aconseja, por tanto, utilizar electrodos aislados para medir con precisión el índice de humedad en una profundidad dada.
- Si se quiere medir el índice de humedad en anhidro de la madera a la salida del secadero con un higrómetro de puntas o de contacto, hay que tener en cuenta el parámetro «Temperatura de la madera». De hecho, los higrómetros necesitan configurar ese dato para ofrecer una medida más precisa. A la salida del secadero, la madera no está a la temperatura exterior, sino a la temperatura de salida del secadero, que es más alta.

4. Equilibrio higroscópico de la madera

A. ¿Qué es la humedad de equilibrio?

Pregunta: ¿Hacia qué índice de humedad van a tender estas dos piezas de madera de roble si las colocamos durante mucho tiempo en el mismo ambiente y con condiciones climáticas estables (temperatura y humedad relativa)?



Figura 10: Madera con índice de humedad en anhidro del 10%



Figura 11: Madera con índice de humedad en anhidro del 60% (madera verde)

Respuesta: Tenderán hacia el mismo índice de humedad llamado equilibrio higroscópico.

El equilibrio higroscópico o «humedad de equilibrio» de la madera es el índice de humedad hacia el que tiende la madera bajo unas condiciones de temperatura y humedad estables. Lo llamamos «H% eq.», «HE», «UGL (en alemán)» o también «EMC (*Equilibrium Moisture Content*)». Esta humedad de equilibrio es prácticamente independiente del tipo de madera pero depende de dos características: la temperatura T (°C) y la humedad relativa del aire Rh (%).

Se mide con un termohigrómetro por medio de las curvas de Keylwerth o también con el papel secante en los secaderos.

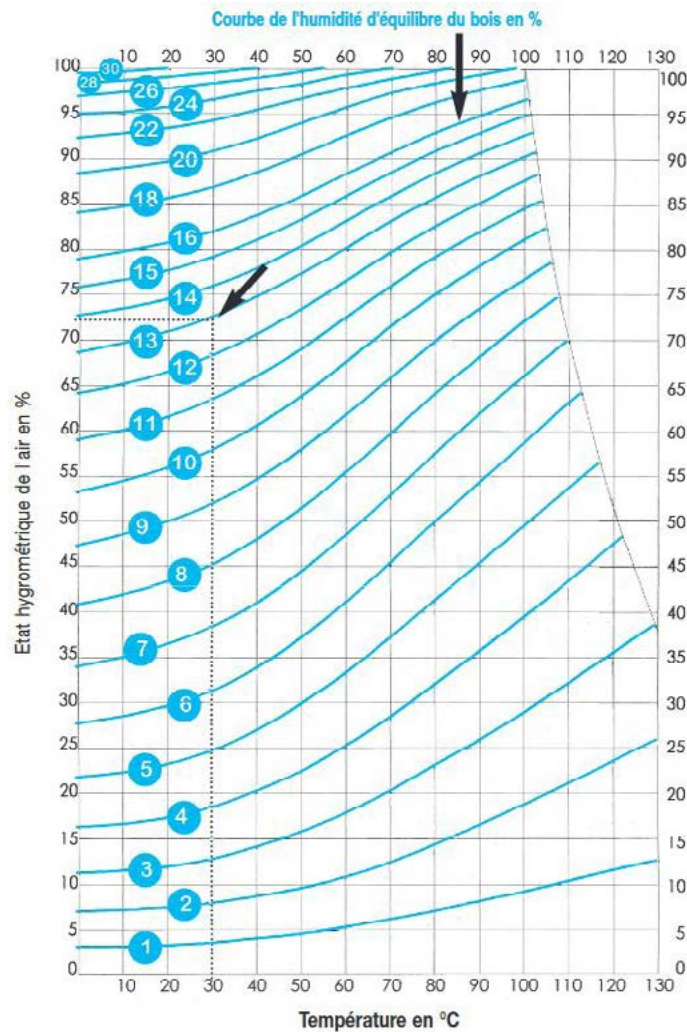


Figura 12: Índice de equilíbrio higroscópico de la madera (%) (Mémotech - Bois et matériaux associés, 2013)

❖ Ejemplo de uso

Ejemplo 1: ¿Cuál es la humedad de equilibrio H_{eq} (%) de una pieza estructural que se encuentra en unas condiciones de temperatura $T=30\text{ °C}$ y de humedad relativa Rh (%) = 72%?

Respuesta 1: H_{eq} (%) = alrededor del 13%

Ejemplo 2: ¿Cuál es la humedad de equilibrio H_{eq} (%) de una pieza estructural que se encuentra en unas condiciones de temperatura $T=22\text{ °C}$ y de humedad relativa Rh (%) = 40%?

Respuesta 2: H_{eq} (%) = 7,5%.

En «VII – Tabla de humedades de equilibrio» de la página 76, encontrará una tabla que establece para una temperatura y humedad relativa dadas la humedad de equilibrio correspondiente.

B. La humedad de equilibrio: una variable importante

En el clima templado existente en Francia, durante el periodo más seco las condiciones atmosféricas son del orden de 20 °C y 70% de humedad relativa del aire (HR), lo que se corresponde con un equilibrio higroscópico de la madera próximo al **13%**. Durante el periodo más húmedo, las condiciones atmosféricas son del orden de $0\text{ °C} - 5\text{ °C}$ y 85% de humedad relativa del aire (HR), lo que corresponde a un equilibrio higroscópico de la madera del orden del **19%**.

Por tanto, en una obra en madera en el exterior (ventanas, contraventanas, revestimientos), la humedad tenderá 13% en verano y al 19% en invierno. Para que los cambios de la madera sean mínimos, su humedad tendrá que situarse en la mitad de la horquilla de variación, o sea en un **15% a 16%**. En el acabado exterior, también habrá que tener en cuenta fenómenos como el punto de rocío⁸, que pueden modificar considerablemente la humedad de la superficie de la madera.

Umbral para el exterior	H _r (%)	T (°C)	H _{eq.} (%)	H _{madera} de instalación en el exterior
Verano = Min	70	20	13	15 - 16%
Invierno = Máx	85	0/+5	19	

De la misma forma, una madera que esté en el interior de una casa con calefacción variará su humedad según pasen las estaciones. En verano, las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire están próximas a las condiciones exteriores. El equilibrio higroscópico de la madera estará entre el 12% y el 13%. Por el contrario, en invierno la temperatura del interior es de 20 °C, la humedad relativa del aire es cercana al 30% y la humedad de equilibrio estará en torno al 7%. La humedad media de la madera durante la ejecución de obras interiores (parqués, paneles, puertas) debe ser del **10%** aproximadamente.

Umbral para el interior	H _r (%)	T (°C)	H _{eq.} (%)	H _{madera} de instalación en el interior
Invierno = Min	30	20	7	10 %
Verano = Máx	70	20	13	

Subrayamos que, según el producto se use en el interior o en el exterior la madera se habrá de secar a un índice de humedad concreto para evitar que nuestro producto sufra cambios.

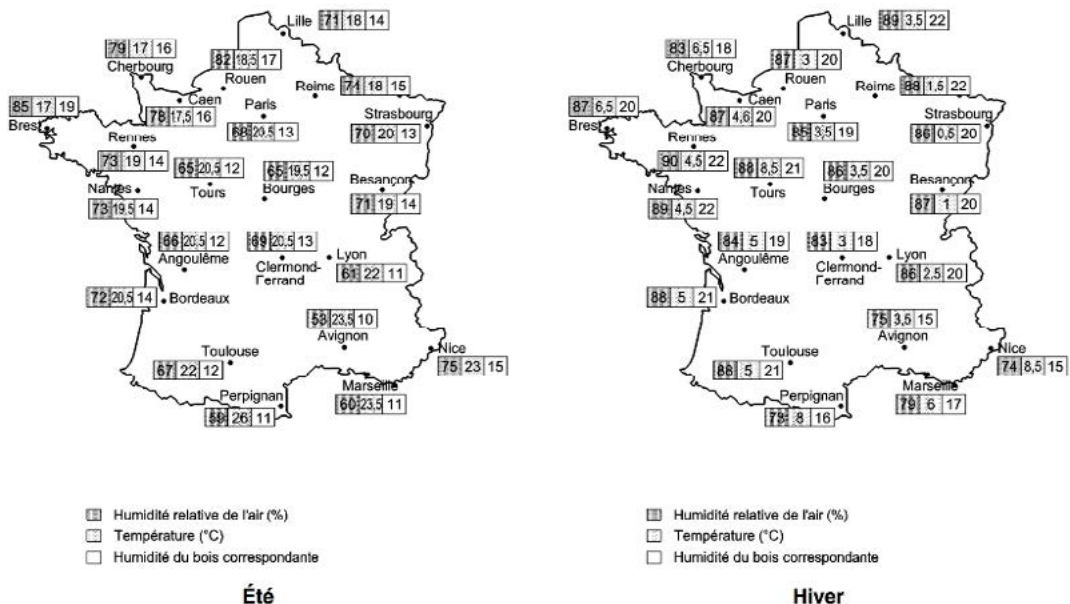


Figura 13: Sacada de DTU 41.2 «Revestimiento exterior» - Humedad

⁸ El punto de rocío o temperatura de rocío es la temperatura más baja a la que una masa de aire puede ser sometida a una presión y humedad dadas sin que se produzca formación de agua líquida por saturación.

El secado de la madera a un índice de humedad de equilibrio con el objetivo de anticipar estas variaciones en el tiempo está especificado en varios DTU⁹, pero citaremos solo el ejemplo del DTU 41.2 «Revestimientos exteriores en madera». Esta noción tan importante de la humedad de equilibrio nos lleva, como no podía ser de otra manera, a otra noción: el índice de humedad de la madera en servicio.

5. Índice de humedad de la madera en servicio

Se define como la humedad de **equilibrio que corresponde a las condiciones climáticas medias del lugar donde se está utilizando la madera**. En Francia, hemos podido determinar las humedades en servicio teniendo en cuenta las medias climáticas del año tanto en el interior como en el exterior. A estos datos climáticos se añaden imperativos técnicos debidos, por ejemplo, a las operaciones realizadas en la fábrica, al encolado o también al barnizado. Explicamos también que, para los diferentes trabajos, hay que alcanzar un índice de humedad en función del servicio final del producto (véase la siguiente figura).

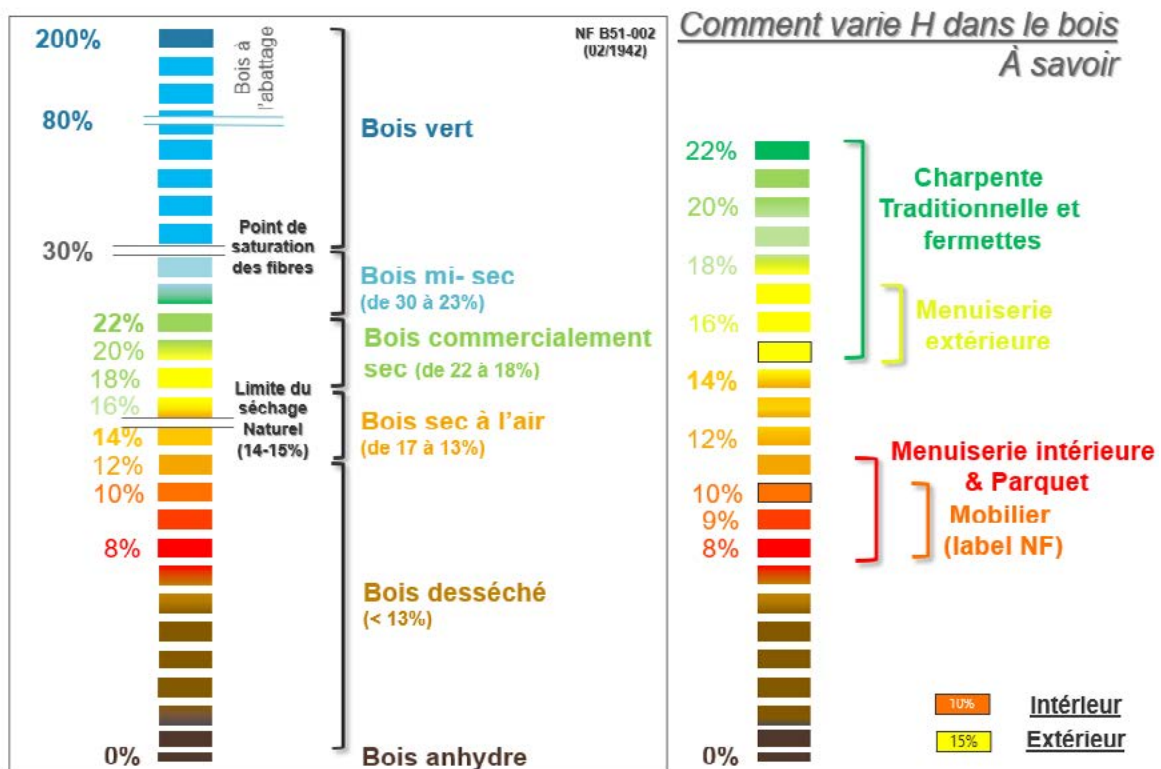



Figura 14: Izquierda: Denominación según la NF B51-002¹⁰. Derecha: Recomendación sobre los índices de humedad a conseguir según el tipo de servicio que la madera va a ofrecer. (CRITTBois, 2018)

Por tanto, si usted es carpintero, sus cerchas deberán tener un índice de humedad en base seca entre el 18% y el 22%. Un ebanista preferirá utilizar una madera que tenga entre el 8% y el 10%. Evidentemente, de toutes évidences, un produit est soit disposé en extérieur, soit à l'intérieur. **Nosotros aconsejamos que siempre se busquen las humedades específicas en la tabla anterior, un 10% para los productos instalados en el interior y un 15% para los de exterior.**

⁹ DTU : Documents Techniques Unifiés.

¹⁰ NF B 51-002 (02/1942): Madera – Características físicas y mecánicas de la madera.



Esta última observación hay que matizarla con un aspecto importante: la operación de almacenado del producto justo después del secado. Si se almacena un producto a H= 10% en un espacio húmedo antes de ponerlo en venta / enviarlo a una fábrica, seguro que volverá a coger humedad.

Es importante controlar la operación de postsecado para facilitar las posteriores operaciones de mecanizado y encolado. En vista de esto, algunas empresas secan a un índice de humedad ligeramente inferior teniendo en cuenta esa recuperación de humedad.

En el apartado «10) El almacenamiento postsecado» de la página 57 hablamos de estos fenómenos de recuperación de humedad, los cuales son muy variables y aleatorios pues dependen de la duración y las condiciones del almacenamiento postsecado.

6. Contracción y coeficiente de contracción

A. Contracción

Como mencionábamos en la página 14, por debajo del Punto de saturación de fibras, eso es cuando la humedad de una pieza de madera disminuye por debajo del 30% de media y ya no queda agua libre en la madera, es cuando se elimina el agua de impregnación. Sin embargo, durante esta operación, la variación de la humedad va a ser responsable de fenómenos de deformación, provocando una compactación y disminución del volumen llamada «contracción». Cuando ocurre lo contrario, eso es cuando la madera vuelve a coger humedad, hablaremos del fenómeno de la «hinchazón». Estos dos fenómenos son muy sensibles a la anisotropía de la madera y no se producen de la misma manera ni con la misma intensidad en las direcciones axial (longitudinal), radial y tangencial. La contracción axial se considera muy baja, incluso despreciable, puesto que es entre 20 y 25 veces menor que la contracción radial. La contracción radial es la mitad de la tangencial, siendo esta última la más importante y la más dañina de las tres.

La contracción es el porcentaje de la variación dimensional de la madera en una dirección dada, entre el Punto de saturación de fibras y el estado anhidro. Para una especie de madera dada, la contracción puede variar en gran proporción en función de las características del suelo y de las condiciones climáticas del lugar donde el árbol estaba plantado.

La siguiente tabla muestra los valores medios de la contracción de las especies frondosas y coníferas comunes.

Tabla 2. Valores medios de la contracción de las especies pirenaicas.

Especie	Contracción tangencial total (%)	Contracción radial total (%)	Contracción volumétrica total (%)
Roble	10,0	5,0	15,0
Haya	12,0	6,0	18,0
Abeto de los Pirineos	7,09	3,05	10,14
Pino silvestre	8,0	5,0	13,0
Pino Radiata	*)	*)	*)
Pino negro	*)	*)	*)

*) Falta de datos

B. Coeficiente de contracción

Los coeficientes de contracción expresan, en porcentajes, la variación dimensional de la madera por una diferencia de humedad del 1% por debajo del Punto de saturación de fibras (PSF).

La siguiente tabla indica los coeficientes de contracción de las especies pirenaicas (consideraremos la contracción longitudinal como nula):

Tabla 3: Coeficientes de higroscopicidad de las especies pirenaicas.

Especies	Coeficientes de contracción		
	Radial	Tangencial (= 2 x contracción radial)	Volumétrica
Roble	0,16	0,32	0,50
Haya	0,23	0,43	0,72
Abeto de los Pirineos	0,14	0,27	0,41
Pino marítimo	0,11	0,20	0,34
Pino Radiata	*)	*)	*)
Pino negro	*)	*)	*)

*) Falta de datos

C. Cálculo de la contracción

La contracción (pérdida de volumen) entre el Punto de saturación de fibras (30% de media) y el índice de humedad H, expresado en % (comprendida entre 0 y 30), se puede calcular de dos maneras:

Coeficiente de contracción volumétrica x (30 - H)

o

Contracción total x (30 - H) / 30

Ejemplo: La contracción radial del roble entre el Punto de saturación de fibras (30%) y un índice de humedad del 12% es de $0,17 \times (30 - 12) = 3,06\%$.

De ahora en adelante, sabemos que: La madera y sus 3 grandes propiedades.

- Los estados en los que el agua se encuentra en la madera.
- Los diferentes métodos de medida del índice de humedad en base anhidra.
- El vocabulario que se utilizará.
- Los índices de humedad a intentar conseguir en el exterior y en el interior.
- Como calcular la contracción y la higroscopicidad.

¡Estos datos teóricos le permitirán abordar el mecanismo de secado comprendiendo que fenómenos están teniendo lugar cuando cierra la puerta del secadero!

7. Mecanismos de secado

A. Dos fenómenos importantes: la circulación y la evaporación.

Estemos ante un secado natural o uno artificial, se da siempre el mismo mecanismo de secado, que se traduce en dos fenómenos¹¹: (véase la figura 15 a continuación):

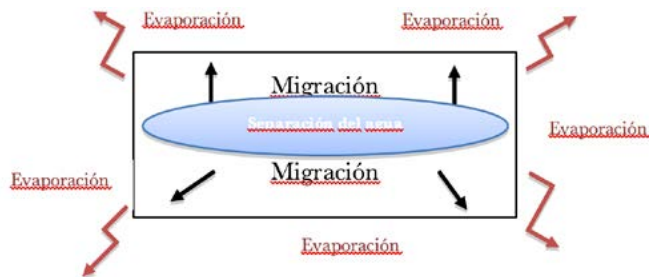


Figura 15: Mecanismo de secado (CRITTBois, 2018)

1. La migración del agua desde el centro hacia el exterior del material.

2. La evaporación del agua del interior del material y de la superficie.

Es importante encontrar justo el equilibrio entre la migración y la evaporación del agua en la madera. Si la migración del agua se hace desde las zonas húmedas hacia las secas; en teoría, se necesita un gradiente alto de humedad de la madera, pero habrá mayores riesgos de que se degrade la madera. Nos quedamos entonces con que es preferible aplicar una humedad relativa del aire elevada al inicio el secado (humidificación).

B. Sentido de migración del agua

El agua en la madera está presente en estado líquido y gaseoso (vapor). En el momento en que existe el gradiente de temperatura en la madera, el agua de ambos estados circula desde las zonas calientes a las frías. Y, cuando la temperatura aumenta, la circulación de vapor se acelera. Lo mismo ocurre con la humedad, puesto que existe el gradiente de humedad, el agua va a querer circular desde las zonas húmedas a las secas.

Gradiente de temperatura



Figura 16: Circulación desde las zonas calientes a las frías. (CRITTBois, 2018)

Gradiente de humedad

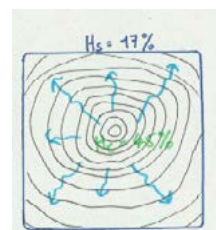


Figura 17: Circulación desde las zonas húmedas a las secas. (CRITTBois, 2018)

Si ces mécanismes s'opposent, c'est le **phénomène le plus fort qui impose le sens de circulation** de l'eau dans le bois. On comprend bien que ces différents paramètres vont influencer sur la circulation de l'eau au sein du matériau et peut être source de tensions et donc de défauts.

¹¹ En realidad hay tres fenómenos. El primero es la separación del agua. El agua se separa de las micelas antes de iniciar el fenómeno de la migración. Esta omisión voluntaria no tiene ningún impacto en el marco de esta guía.



C. Factores que influyen en los mecanismos de secado

Como hemos visto anteriormente, la circulación y la evaporación entrañan un gradiente de humedad. Un gradiente de humedad demasiado alto significa que las partes externas de la madera comienza a contraerse mientras las partes internas tienen todavía mucha agua libre. Como resultado se producen grandes tensiones y deformaciones considerables. El gradiente de humedad es el responsable de la migración del agua en la madera desde el corazón hacia el exterior. Hay factores relacionados con las condiciones de secado que influyen en los fenómenos de migración y evaporación (véase la tabla 4 a continuación). Podemos señalar:

- La temperatura del aire.
- La humedad relativa del aire.
- La velocidad de circulación del aire dentro del secadero.
- La presión.
- Las características de la madera (especie, índice de humedad, espesor, densidad).

Tabla 4: Síntesis de los factores que influyen en el secado de madera (G. Gandon, OLERGIE)

Madera	Aire	T°C ↗	Humedad relativa Rh (%) ↘	Velocidad (m/s) ↗	Presión (mb) ↘ (al vacío)
Circulación (Del corazón a la superficie)		↗↗	-	-	↗↗
Evaporación (De la superficie al exterior)		↗	↗↗	↗↗	↗↗

Recordemos que (excepto el factor «presión» que solo lo encontramos en los secaderos al vacío) **el factor que más influye en los mecanismos de secado es la temperatura**. Gestionar un secadero con una cierta humedad relativa del aire o velocidad de circulación del aire no tiene ningún interés si estas no son capaces de aumentar la evaporación para evitar defectos.

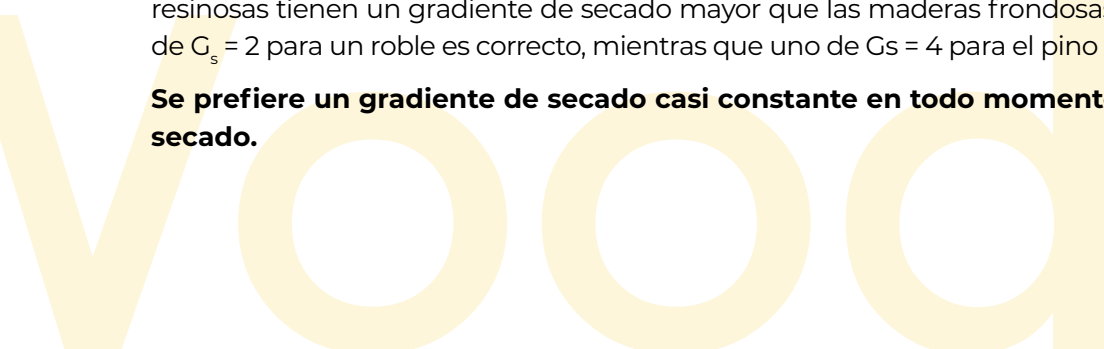
D. Gradiente de secado

El gradiente de secado es la relación entre el índice de humedad de la madera mientras se seca (dato obtenido por sondas) y el equilibrio higroscópico de la madera (dato obtenido por el papel secante del secadero). Lo denominamos G_s y lo expresamos así:

$$G_s = \frac{H\%(sonde)}{HE (\%)}$$

Un gradiente de secado elevado indica una intensidad alta de secado. Hay que saber que las maderas resinosas tienen un gradiente de secado mayor que las maderas frondosas. Un gradiente de secado de $G_s = 2$ para un roble es correcto, mientras que uno de $G_s = 4$ para el pino también está bien.

Se prefiere un gradiente de secado casi constante en todo momento durante el proceso de secado.



8. Defectos relacionados con el secado de madera

Sabemos entonces que la madera está sujeta a variaciones dimensionales y en consecuencia a defectos. Es muy importante conocer sus nombres y características para evitarlos o ser capaces de identificarlos para controlar mejor los procesos de secado y evitar así fallos que nos hagan descartar el material. Estos son los distintos defectos que nos

podemos encontrar durante el secado de madera:

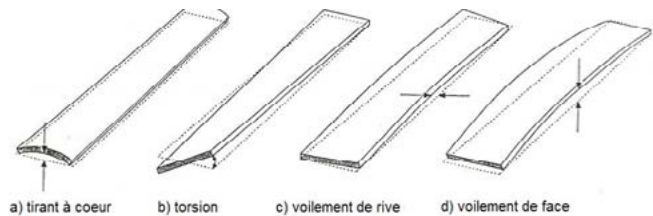
- Deformación.
- Decoloración / Coloración.
- Azulado.
- Fendas.
- Colapso.

A. Deformación

Pueden aparecer cuatro tipos clásicos de deformación después del secado de la madera (véase la siguiente figura):

- Curvado de cara.
- Curvado de canto.
- Alabeo.
- Abarquillado o atejado.

Figur



B. Decoloración / Coloración

La decoloración es el cambio de color de algunas sustancias químicas contenidas en ciertos tipos de especies. El roble, muy sensible a este fenómeno, tendrá un tono gris tirando a castaño. El haya tendrá un color rosáceo.

❖ Regla del 30 para el roble y el haya

Mientras que el índice de humedad de la madera sea superior al Punto de saturación de las fibras, alrededor del 30%, y que la temperatura circundante sea superior a los 30 °C, existe un fuerte riesgo de decoloración. Para evitarlo debemos respetar rigurosamente los primeros ciclos de secado (véase 3 el roble, p. 59) y (4, el haya, p. 62).

C. Azulado

El azulado se produce por los hongos ascomicetos de distintas especies que se desarrollan casi únicamente en células vivas. El azulado se manifiesta siempre por un tono generalmente azulado, a veces bastante claro, pero puede llegar hasta el azul oscuro. Esta coloración puede darse de manera generalizada en casi toda la masa de la madera o puede estar más localizada en las secciones transversales.



Figura 19: Azulado (CRITTBois, 2018)

Se constata este fenómeno sobre diversas especies resinosa de madera, en particular, en los pinos. Por su parte, el abeto es poco sensible. Este fenómeno modifica el aspecto del material pero no sus cualidades técnicas.

El azulado aparece siempre un tiempo después de la tala sobre los rollos o troncos. Para llegar a evitar el azulado, se debe efectuar un secado de la madera suficientemente rápido poco después del aprovechamiento forestal.

D. Fendas

❖ Fendas externas

Las fendas externas se pueden producir generalmente al principio del secado. Cuando el corazón de la madera está menos avanzado en la contracción que las partes de la superficie, estas partes se resisten a la contracción de la madera en la superficie, sujetas a fuerzas de tensión. Por su parte, el corazón está bajo fuerzas de compresión. Cuando las tensiones son excesivas, la superficie de la madera se rompe y se crean así las fendas externas.

❖ Fendas internas

Cuando toda la masa de la madera tiene un índice de humedad en base anhidra inferior al Punto de saturación de fibras (PSF), las zonas internas se someten a fuerzas de tracción y las zonas de la superficie a fuerzas de compresión. Es decir, que hay un gradiente de humedad demasiado alto entre la parte central de la pieza y la superficie. Si estas tensiones son superiores a la resistencia mecánica, aparecerán fendas internas, no visibles en el exterior. Este defecto se debe a un aire demasiado seco cuando las zonas internas están todavía por encima del PSF. Entonces, vemos que el efecto aparece luego de la causa. El remedio es aplicar una higrometría del aire más elevada desde el principio del secado.

❖ Fendas en los extremos



Figura 20: Fendas en los extremos en haya al salir del secadero (CRITTBois, 2018)

Las fendas en los extremos también se deben a una evaporación demasiado intensa en las extremidades de los tablones. Aquí, el agua migra muy fácilmente en el sentido longitudinal de la madera.

E. Colapso (Roble)



Figura 21: Colapso (retracción celular) (ABARCO EXPERTISES)

Consiste en una retracción celular que se caracteriza por provocar ondulaciones en la superficie. A menudo se acompañan de fendas. El colapso se produce cuando la madera está muy húmeda y aplicamos aire a una temperatura demasiado alta al inicio del ciclo. Es un defecto grave que no tiene arreglo. El roble es particularmente sensible al colapso. Podemos prevenir este fenómeno manteniendo una temperatura lo suficientemente baja al principio del ciclo.

En el anexo 4 encontrarán un documento de CRITTBois Occitanie sobre el tratamiento de defectos. (P. 90)

9. Controlar la humedad relativa después del secado es controlar los defectos

Sucede a menudo que los defectos aparecen después del secado de la madera, aunque se hayan controlado bien las operaciones antes y durante el secado. El problema lo encontramos frecuentemente en que se cree que el índice de humedad de la madera a la salida del secadero no cambiará o lo hará poco. Sin embargo, como hemos explicado varias veces a lo largo de esta guía, la madera es un material higroscópico, lo que significa que su índice de humedad en anhidro va a variar en función de las condiciones climáticas en las que quede instalado. Estas recomendaciones son especialmente válidas para los ebanistas y otras profesiones que trabajan la madera a un índice de humedad entre el 6% y el 11%.

En consecuencia, si se dejan los lotes de haya secados al 10% en el exterior unos días antes de efectuar las operaciones de mecanizado o de encolado, sin duda se está incurriendo en el riesgo de que se produzcan defectos debido a que la madera vuelva a coger humedad. Estos defectos de todo tipo aparecerán durante esta fase de acondicionamiento postsecado o durante las operaciones de mecanizado o de encolado. Lo mismo ocurre con los lotes colocados en almacenes no cerrados y muy ventilados.

Los carpinteros que trabajan con productos de índices de humedad bajos pueden referirse a los valores marcados en verde en el punto VII – Tabla de humedades de equilibrio de la página 77. Estos datos muestran que es necesario controlar las condiciones de temperatura y sobre todo de humedad relativa de los lugares de almacenamiento de lotes de madera seca, con el objetivo de que los índices de humedad de las piezas de madera no varíen demasiado antes de las operaciones de mecanizado o de encolado.

En estos talleres, para unas temperaturas entre el 15% y 25%, la humedad relativa del aire debe estar imperativamente entre el 45% y el 60%. Nosotros les recomendamos alcanzar entre el 50% y el 55%.



Para controlar este factor, existen varios dispositivos y varios proveedores industriales que les podrán asesorar acerca de este tipo de herramientas, la cantidad, la distribución y el funcionamiento.

Una vez definidas las bases teóricas, pasaremos a hablar del secado. Detallaremos las etapas esenciales que hay que respetar y que nos van a garantizar una buen secado de la madera. Ya que esta guía está pensada para dar recomendaciones sobre las especies pirenaicas (roble, haya, pino radiata, pino marítimo, pino negro y abeto) vamos a tratar, en la última parte, las recomendaciones específicas para estas especies.

Los **dos capítulos** que siguen a continuación van a tratar dos técnicas de secado: el secado al aire libre y el secado artificial.

Estas dos partes van a mostrar un punto de vista similar y muy importante para que el secado de los productos se desarrolle correctamente: **el enrastrelado y el apilado de los productos antes del secado.**

Estos dos procedimientos son decisivos para la calidad del secado de la madera, puesto que aplican todo lo que hemos visto anteriormente con respecto a las bases teóricas de la madera. Además, garantizan en buena parte la técnica de secado utilizada.



LOR

K

ST



III. Secado al aire libre

1. Enrastrelado y apilado para el secado al aire libre

A. Características de los rastreles

Para que la madera seque tiene que haber intercambio con el aire. Las tablas que acaban de ser cortadas tienen que apilarse en un lugar ventilado. El apilado tiene mucha importancia para la obtención de buenos resultados de secado. Una pila está formada por un conjunto de tablas superpuestas entre las que se colocan los rastreles. Estos permiten la circulación del aire entre las tablas. Las dimensiones de las pilas varían en función de las condiciones locales y de las dimensiones de las tablas o de los lotes. La altura puede variar entre 1 m y 2 m, mientras que el ancho entre el 1 m y 2,5 m, dependiendo del tipo de carretilla elevadora que tenga la empresa. En una misma pila solo habrá madera de una en **misma especie, del mismo grosor y del mismo índice de humedad inicial en la medida de lo posible.**

Los rastreles deben cumplir con ciertos criterios porque, a menudo, de un buen enrastrelado depende un buen secado. A continuación, se exponen dichos criterios:

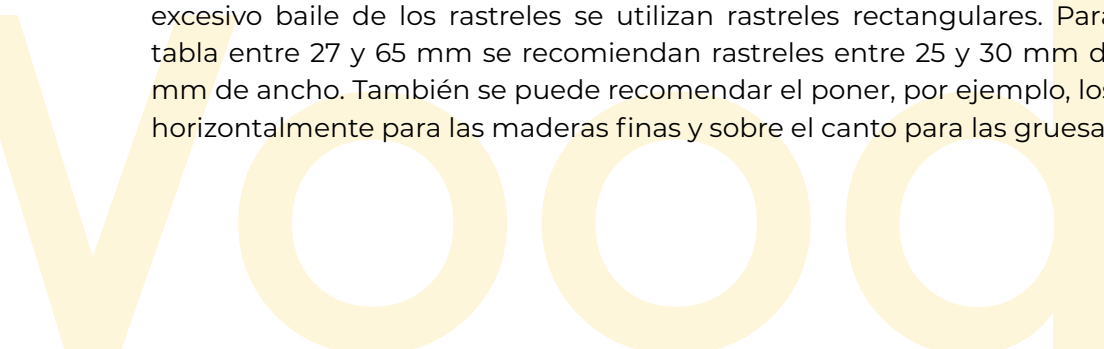
- Ser secados al aire libre (es decir entre 15% y 18%). Aquí la especie importa poco, pero solemos usar maderas resinosas neutras como el pino o maderas frondosas sin albura.
- Que estén lo más rectos posible.
- Que durante la formación de la pilase distribuyan de manera que estén bien alineados, siguiendo la vertical y colocados perpendicularmente a las fibras de la madera.
- Además, la primera y última filas de rastreles deben estar lo más cerca posible de las testas (extremos de las tablas).


Finalmente, la distancia entre las filas debe estar en relación con el grosor de las tablas. Es decir, cuanto más finas sean las tablas, más juntas tienen que estar las filas de rastreles y cuanto más gruesas sean las tablas, más separadas pueden estar las filas. Podemos tomar como base los valores indicados en la siguiente tabla.

Tabla 5: Características de los rastreles a utilizar para el secado natural (CRITTBois, 2018)

Grosor de la madera (mm)	Grosor de los rastreles (mm)	Separación de los rastreles (cm)
18 à 20	20	30 à 40
20 à 35	25	40 à 50
40 à 50	30	50 à 60
50 à 65	35	70 à 80
65 à 80	40	90
más de 80	45	100

Nota: Aunque se recomienda usar rastreles de sección cuadrada, en la práctica, para evitar un excesivo baile de los rastreles se utilizan rastreles rectangulares. Para grosores corrientes de tabla entre 27 y 65 mm se recomiendan rastreles entre 25 y 30 mm de grosor y entre 30 y 40 mm de ancho. También se puede recomendar el poner, por ejemplo, los rastreles de 25 x 35 mm horizontalmente para las maderas finas y sobre el canto para las gruesas.





A menudo, es deseable ralentizar la velocidad de secado en el extremo de las tablas pues una migración demasiado rápida de la humedad favorece la aparición de fendas de mayor o menor importancia. Para evitar este fenómeno, podemos **pintar las extremidades de las tablas** con parafina. Aunque sea menos común, podemos clavar listones en los extremos del grosor de la madera, estos listones tendrán indirectamente el papel de limitar la intensidad de la evaporación en los extremos. De la misma manera, otras empresas utilizan «S» metálicas de poco grosor, que también se colocan en los extremos.

B. Área de almacenamiento



+ 50cm

El suelo sobre el que se van a colocar las pilas tiene que estar limpio y sin trozos antiguos de madera, hierbas, etc. que favorezcan el ataque de hongos e insectos. A ser posible, el suelo tiene que estar pavimentado o recubierto de arena compacta. Las pilas se colocan sobre tacos de cemento de **50 cm** de altura aproximadamente. En el caso de las maderas finas, los tacos de cemento se espacian de manera que las filas de los rastreles se correspondan con los tacos de cemento.

C. Distribución y orientación de las pilas

Una vez que tengamos las pilas formadas y el enrastrelado correctamente realizado deben distribuirse sobre el espacio del secadero. Por ejemplo, podemos alinear las pilas en filas paralelas con dos pilas una al lado de la otra si no son demasiado grandes y dos pilas, una encima de la otra. Las filas de las pilas pueden tener una longitud que varía dependiendo de la superficie de la que dispongamos, una altura entre 3 m y 4 m y un ancho de entre 2 m y 2,5 m.

Para separar una fila de otra debemos respetar una distancia de 60 cm. Después, entre estas dobles filas, formaremos pasillos cuyo ancho depende de los equipos de manipulado.

La orientación de las pilas se escoge en función de los vientos dominantes, cuyo **flujo debe incidir perpendicularmente sobre las pilas**.

La primera capa de planchas no debe estar a menos de 50 cm del suelo, de manera que el aire húmedo y frío, que tiene tendencia a acumularse en la parte baja de las pilas, se pueda eliminar. Hay que saber que, en el secado al aire libre, si no hay viento se crea un circuito de aire natural de arriba hacia abajo puesto que el aire, a medida que se humedece, se enfría y por tanto desciende.

Finalmente, si es posible, se recomienda cubrir la parte superior de las pilas para protegerlas de la lluvia o de mucho sol.

Un pequeño truco: En algunas regiones de los Pirineos expuestas a la nieve, podemos colocar una malla, como las que se usan en la recogida de fruta, sobre lo alto de la pila o sobre el tejado del sitio donde hayamos guardado las pilas y que caiga hasta abajo del todo. De esta manera la nieve no estará en contacto con la madera.

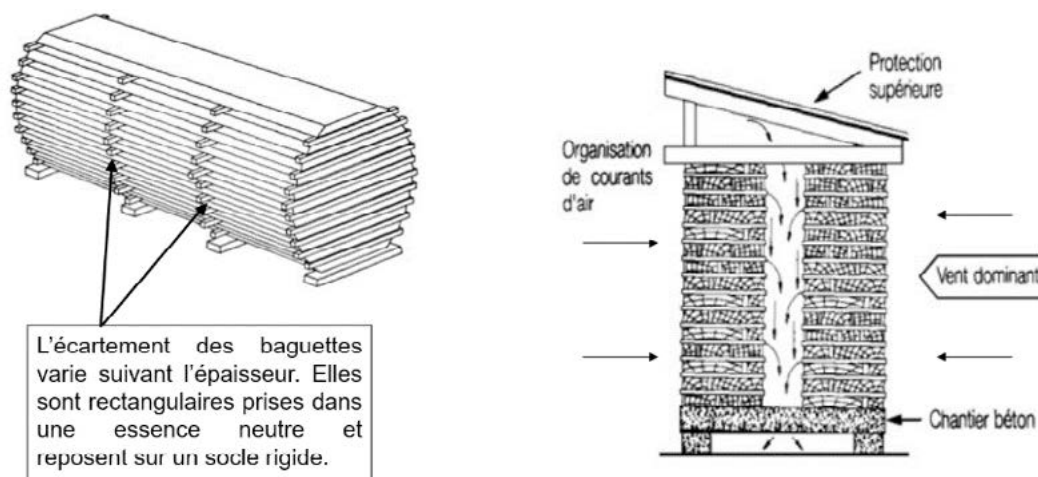


Figura 22: Distribución de las pilas de madera para el secado (G. Gandon, OLERGIE)

D. Fecha de apilado y tiempos de secado

La fecha de apilado influye mucho sobre la duración del secado al aire. Aquí pueden ver algunos ejemplos sobre la duración del secado al aire libre.

Tabla 6: Algunos ejemplos de tiempos de secado al aire libre (CSTB)

Especie	Grosor (mm)	Humedad de la madera (%) Inicial / Final		Periodo de apilado	Tiempo de secado (semana)
Abeto	27	60	20	julio	2
Abeto	27	120	20	julio	3
Haya	34	120	25	marzo	19 à 20
Roble	27	85	20	marzo	19
Roble	27	80	18	diciembre	26
Roble	27	80	15	diciembre	32
Pino silvestre	41	100	15	marzo	10

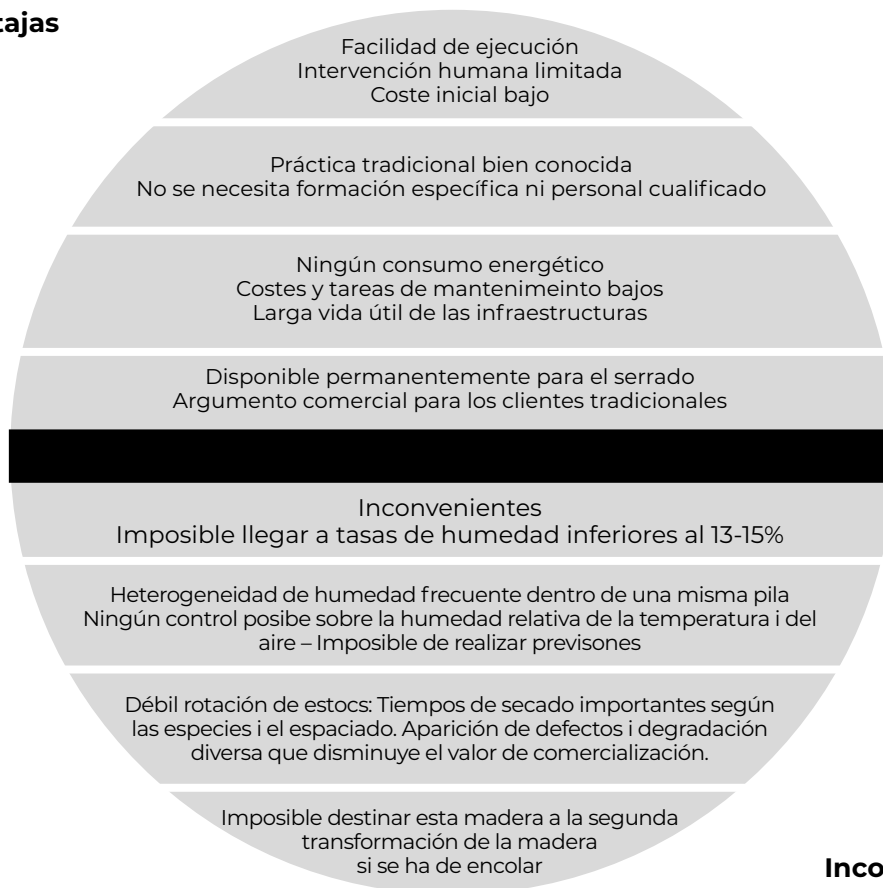
Aquí no se mencionan todas las especies y estos datos son muy variables. Se recomienda el uso del higrómetro y una ficha de seguimiento para la confección de los tiempos de secado de acuerdo con la localización geográfica y las especies de madera que se vayan a secar.

2. Ventajas e inconvenientes del secado al aire libre

El secado al aire libre es un método sencillo de poner en práctica, pero tiene un gran inconveniente: depende mucho de las condiciones meteorológicas y topográficas que le sean propias a la empresa. El otro inconveniente es la larga duración del secado, porque la empresa tiene que colocar una gran cantidad de madera en sus instalaciones. El acopio de material supone una gran ocupación de superficie de suelo y representa una inmovilización del capital. Además, cuanto más se diversifican los clientes y la gama de productos que demandan más grandes la superficie del suelo habrá que ocupar para el almacenamiento. Una rotación baja del stock genera unos tiempos de secado mayores y heterogeneidad frecuente debido a la humedad.

Veremos que esta práctica es antigua y la conocen bien los serradores. Este método no consume energía externa y ha servido de argumento comercial para los clientes «tradicionales», por así decirlo. Aquí vemos una lista no exhaustiva de ventajas e inconvenientes de este método que hemos obtenido de *Le séchage des feuillus une nécessité économique*, 1991 (El secado de las maderas frondosas, una necesidad económica):

Ventajas



Inconvenientes

Figura 23: Ventajas y desventajas del secado al aire libre (*Le séchage des feuillus une nécessité économique*, 1991, p. 50)



IV. Secado en cámara

1. Elementos de una cámara de secado

Las condiciones del interior de un secadero son duras: las temperaturas pueden alcanzar los 100 °C e incluso los 120 °C. El grado higrométrico del aire puede llegar al 100% y la madera durante el secado libera ácidos que pueden atacar con dureza las paredes de secadero. Tampoco hay que olvidar que las condiciones de temperatura en el exterior también pueden variar entre los -15 °C y los 40 °C.

Una cámara correctamente fabricada debe cumplir con los siguientes criterios:

- Tener unas dimensiones adaptadas a las necesidades.
- Estar bien aislada.
- Ser estanca.
- Tener una puerta práctica y que cierre perfectamente.

En el mercado existen tres tipos principales de secaderos que funcionan de distinta manera.

2. Presentación de los diferentes sistemas que existen

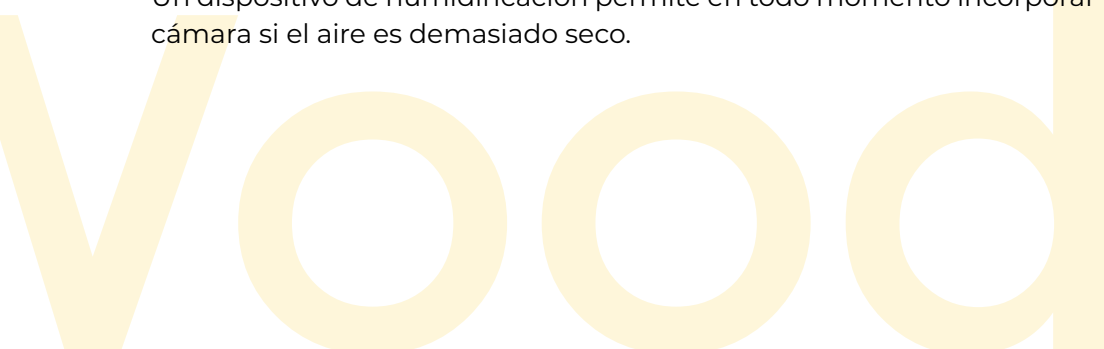
Existen tres grandes tipos de secaderos:

- Los de secado con sistemas de aire acondicionado caliente.
- Los de secado por bomba de calor, también llamados por deshumidificación.
- Los de secado al vacío.

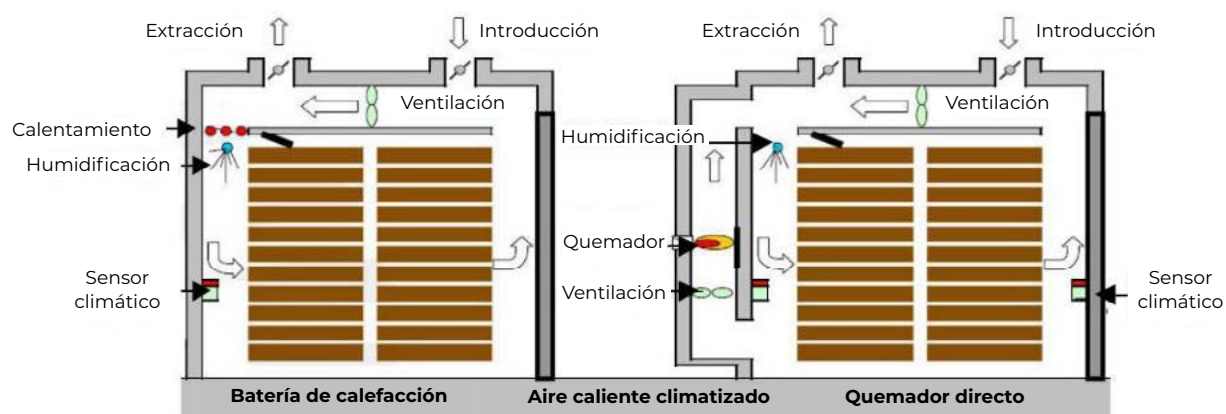
A. *Secado con sistemas de aire acondicionado caliente llamado también «tradicional»*

❖ Presentación del secado con sistemas de aire acondicionado caliente

En esta modalidad, unos dispositivos de calefacción calientan el aire expulsado por los ventiladores. Por estos dispositivos, sean de resistencias eléctricas o de palas, circula el agua caliente, aceite caliente o vapor. Una vez que el aire de la cámara se calienta, los ventiladores dirigen ese el flujo de aire hacia las pilas de madera. La madera se lleva a una temperatura comprendida entre los 50 °C y los 120 °C; y se seca la humedad de la superficie. Después, los ventiladores recogen el aire, de este una parte se evacúa por las chimeneas hacia el exterior, mientras que otra chimenea hace entrar el equivalente del aire que ha salido. Este aire nuevo se mezcla con el existente. El resultado que obtenemos es un aire refrescado, que ha perdido su humedad y que vuelve a pasar por los elementos de calentamiento repitiendo todo el recorrido explicado anteriormente una y otra vez. Un dispositivo de humidificación permite en todo momento incorporar humedad al interior de la cámara si el aire es demasiado seco.



❖ Esquema de los principios del secado por sistema de aire acondicionado caliente



Esquema : FCBA-GN

Figura 24: Secadero con sistema de aire acondicionado caliente (G. Négrié, FCBA)

❖ Información sobre el secado con sistema de aire acondicionado caliente

Ámbito:	Resinosas y frondosas Todos los espesores
Capacidad útil:	De 5 m ³ a 200 m ³
Método:	Temperatura media Temperatura alta
Finalidad:	Todos los rangos de humedad NIMF 15
Proveedores:	Cathild (Francia), Bashild (Italia), Mülhbock (Austria), Incomac (Italia).
Inversión:	1,5K à 2,2K€ /m ³ Capacidad útil (Cpu)

B. Secado por deshumidificación por bomba de calor

❖ Presentación del secado por bomba de calor

Un compresor comprime un líquido refrigerante que después se libera. El ciclo compresión-liberación «produce calor» durante la condensación del fluido y «produce frío» durante la evaporación.

El sistema tiene una batería fría de aletas (de 3 °C a 10 °C) llamada evaporador y una batería caliente de aletas (de 35 °C a 70 °C) llamada condensador.

Un ventilador fuerza al aire caliente y seco a pasar por la madera y después por las 2 baterías. Al entrar en contacto con la batería fría, el aire, que está cargado de humedad al haber pasado por la pila de madera, pierde esa humedad por condensación. De esta forma, el aire se vuelve seco y pasa entonces por la batería caliente que lo recalienta. El ventilador fuerza el aire caliente y seco hacia la pila de madera donde este aire saca la humedad mientras transfiere calor a la pila. Así queda completo el ciclo. El aire nunca está en contacto con el exterior lo que evita al máximo las

pérdidas caloríficas.

El sistema también tiene una batería de aletas calientes que se utilizan al principio del ciclo. Su papel es el de llevar a la madera progresivamente a la temperatura de la cámara, proceso que es aún más necesario en invierno.

La temperatura de secado puede variar entre los 30 °C y 60 °C. Existen 2 grandes tipos de fluido refrigerante pero les aconsejamos utilizar refrigerante HFC por ser más respetuoso con el medioambiente.

Finalmente, el sistema de baterías de aletas puede situarse en el interior o en el exterior de la cámara.

- ❖ Esquema de los principios de secado por bomba de calor

BOMBA DE CALOR

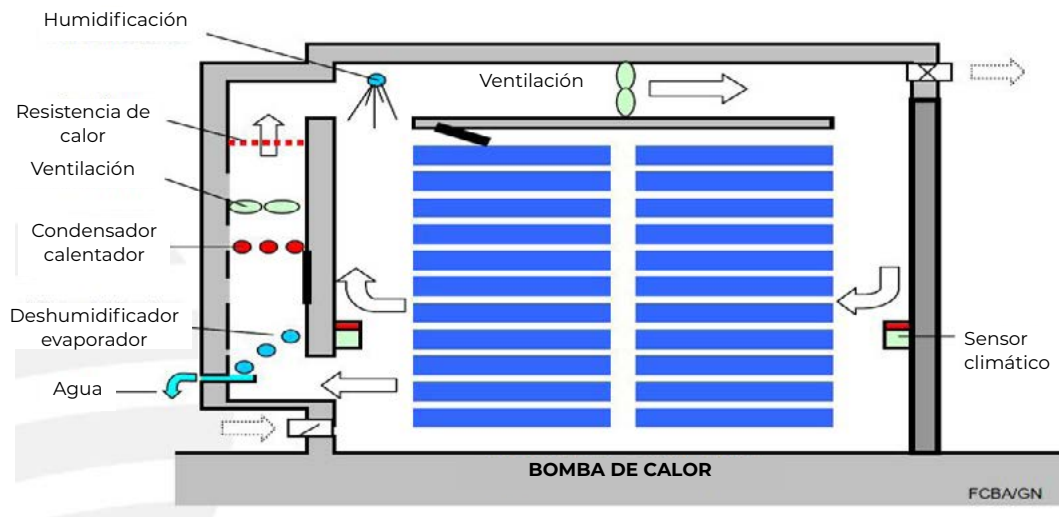


Figura 25: Secado por deshumidificación (G. Négrié, FCBA)

- ❖ Información sobre el secado por deshumidificación

Ámbito:	Principalmente frondosas Todos los grosores
Capacidad útil:	de 5 m ³ a 100 m ³
Método:	Circuito abierto o Circuito cerrado
Finalidad:	14% < H (%) << Madera verde Recursos energéticos limitados
Proveedores:	Incomac (Austria), 3A (Francia), MS System...
Inversión:	2,2K à 2,7K€ / m ³ Cpu

C. Secado al vacío

❖ Presentación del secado al vacío

En la cámara se realiza el vacío. El aumento de la presión favorece la circulación del agua en la madera a baja temperatura: del corazón hacia la superficie. El favorecer la circulación del agua a través de la madera permite disminuir el gradiente de secado y de ahí disminuir el riesgo de tensiones internas y la aparición de fendas. También hay que señalar que los tiempos de secado son más cortos.

Los precios pueden variar según los fabricantes pero estas diferencias residen en el valor del vacío. Cuanto más bajo sea este valor y más se acorte la duración de los ciclos de secado, mejor será la calidad. Del mismo modo, la temperatura de ebullición del agua será baja puesto que si, por ejemplo, estamos hablando de un vacío total, el agua hierve a 0 °C.

❖ Esquema de los principios de secado al vacío

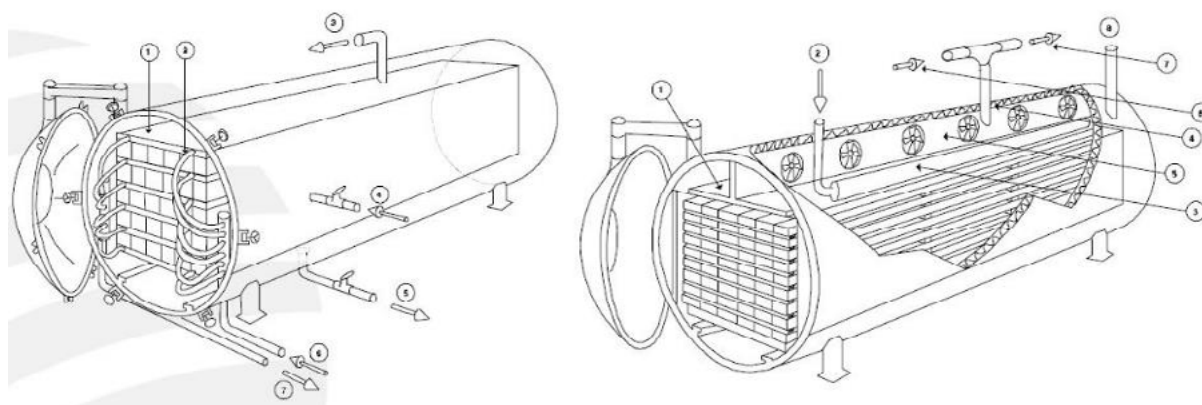


Figura 26: Secado al vacío por placas y por vapor supercalentado (G. Négrié, FCBA)

❖ Información sobre el secado al vacío:

Ámbito:	Coníferas y frondosas
Capacidad útil:	De 1,5 m ³ a 80 m ³
Método:	Vacío continuo Vacío discontinuo Vapor supercalentado
Finalidad:	Velocidad de secado Volumenes pequeños Grosos grandes ¹²
Proveedores:	Kronseider (Allemagne), Maspell (Italie), Mühlbock, Eberl, Brunner, IWT
Inversión:	7K€ à 15K€ / m ³ Cpu

¹² Nótese: grandes grosos: > 40 mm



3. Comparación de los métodos de secado según diferentes criterios

La siguiente tabla compara los diferentes métodos de secado según varios criterios:

Tabla 7: Tabla de comparación de diferentes métodos de secado según varios criterios (G. Gandon, OLERGIE)

Criterios de elección	Aire acondicionado caliente	Bomba de calor	Al vacío
Especies	Fronosas ++ Resinosas ++	Fronosas ++ Resinosas +	Fronosas ++ Resinosas +
Cortes	En paralelo ++ Madera aserrada ++	En paralelo ++ Madera aserrada ++	En paralelo - Madera aserrada ++
Grosos	Todos +	Medios y Grandes + Bajo -	Grandes ++
Índice de humedad en anhidro inicial	Estado verde + Seca ++	Medios y Grandes + Bajo -	Estado verde - Seca ++
Índice de humedad en anhidro final bajo	+	-	++
Volumen a secar	De medio a grande	De bajo a medio	De bajo a grande
Energía de tipo residual	Sí	No	Sí
Electricidad	Sí	Sí	Sí
Gas o combustible	Sí	No	Sí
Rendimiento energético	+	++	+
Tiempos de secado	Rápido	Más bien lento	Muy rápido
++: muy favorable. +: favorable -: poco favorable o poco aconsejable			

- Recordemos que el secado por sistema de aire acondicionado caliente es 1,5 veces más rápido que el secado por bomba de calor.
- Recordemos que el secado al vacío es entre 3 y 8 veces más rápido que el sistema de aire acondicionado caliente.



4. Apilado y enrastrelado para el secado térmico

A. Preámbulo

El secado de la madera se obtiene por un aporte de energía al material transmitido por el aire que pasa por su superficie. Por tanto, como en el secado natural, es necesario que el aire pueda atravesar la pila de madera. Esta es la razón por la que la madera debe descansar sobre rastreles.

Mientras el aire pasa a través de la pila de madera, este aire se carga de humedad procedente del material y se enfría a medida que se evapora el agua. Para que el secado sea homogéneo, se necesita que las condiciones del aire, de temperatura y de humedad relativa del aire no cambien mucho entre la entrada y salida del aire de la pila. Necesitamos que el flujo de aire, es decir, la velocidad del aire a través de la pila sea suficiente.

El aire encuentra resistencia para circular durante su paso y, en consecuencia, hay una pérdida de carga que aumenta cuando el grosor de los rastreles disminuye. **La elección del grosor de los rastreles debe hacerse en función del grosor de las muestras de madera que vamos a secar.**

Por último, hay que tener en cuenta que la separación de las filas del enrastrelado está relacionada con el grosor de las tablas. La alineación entre los rastreles debe ser perfecta. Cada fila de rastreles debe descansar sobre un soporte en la parte inferior de la pila y la última fila de rastreles debe estar lo más cerca posible de los extremos de las tablas.

B. Tipos y dimensiones de los rastreles

En principio, los rastreles de sección cuadrada son los que se utilizan más a menudo. Encontramos normalmente los de secciones de 20x20 mm o 27x27 mm. Habitualmente son de madera y de una especie lo más neutra posible. Podemos utilizar madera de pino silvestre. Los rastreles deben estar secos al 10% - 15% y sanos.

Algunas empresas usan rastreles cuadrados de aluminio de las mismas dimensiones.

El ancho de los rastreles debe ser suficiente para no marcar las maderas blandas pero tampoco demasiado anchos como para evitar que provoquen manchas. Se aconseja seguir la siguiente tabla:

Tabla 8: Dimensiones de los rastreles en función del grosor de las tablas

Grosor (G) de las tablas (mm)	Grosor (g) de los rastreles (mm)	Separación (s) de las filas (cm)
$G < 30$	$18 < \mathbf{g} < 20$ <i>Ejemplo: 20mm</i>	$40 < \mathbf{s} < 60$ <i>Ejemplo: 50cm</i>
$30 < G < 55$	$20 < \mathbf{g} < 27$ <i>Ejemplo: 25mm</i>	$60 < \mathbf{s} < 100$ <i>Ejemplo: 80cm</i>
$55 < G < 80$	$27 < \mathbf{g} < 35$ <i>Ejemplo: 30mm</i>	$80 < \mathbf{s} < 150$ <i>Ejemplo: 100cm</i>
$G > 80$	$\mathbf{g} = 35$	$100 < \mathbf{s} < 150$ <i>Ejemplo: 120cm</i>

Por ejemplo, para una pieza de haya <30 mm procuraremos utilizar rastreles de 20x20 mm y las espaciaremos a una distancia de 50 cm.

C. Ejemplos de buenos y malos apilados

Apilado correcto



Las maderas están separadas por 1 cm y las capas en los extremos están correctamente hechas.

Apilado correcto



Los espacios son exactos y la superposición de los rastreles está correctamente efectuada.

Apilado incorrecto



La primera fila de rastreles está muy alejada del extremo.

Apilado incorrecto



La superposición de los rastreles no es correcta.

Figura 27: Apilado correcto e incorrecto (Crédits photos (CRITTBois, 2018))

5. Operaciones previas al llenado del secadero

Antes de llenar el secadero es importante realizar las siguientes operaciones:

- Comprobación de las boquillas de humidificación y limpiarlas con agua con vinagre si fuese necesario.
- Limpieza de las sondas quitando toda la suciedad porque si no se podrían falsear las medidas.
- Cambiar los papeles secantes (medida de la humedad de equilibrio) antes de cada ciclo de secado (véase la siguiente imagen).



Figura 28: Papel secante a cambiar antes de cada ciclo (CRITTBois, 2018)

Para más información:

Los papeles secantes son los higrómetros que utilizan los métodos eléctricos resistivos (véase «Dos tipos de medidas posibles» de la página 17). Estos nos indican durante el secado el índice de humedad de equilibrio de la madera en unas condiciones en las que el secadero está en un tiempo «t». El papel secante **no mide** la humedad del aire en el interior del secadero.

Si las sondas le indican una $H_{\text{equi.}}(\%) = 8\%$, pero debería ser de 9%, entonces es probable que haya piezas de regulación defectuosas.

6. Colocación de los paquetes en la cámara de secado

Durante la colocación de los productos en paquetes en el secadero, les aconsejamos seguir los siguientes puntos:

- Posicionar las pilas de manera que el flujo de aire incida perpendicularmente a las fibras de la madera.
- Poner las maderas más húmedas al fondo del secadero o en la parte de delante del secadero.
- Poner las maderas más secas en el medio de la cámara.
- Aunque no es aconsejable mezclar los grosores, en caso de que haya que hacerlo, poner los grosores menores en medio de la cámara.

- Colocar los paquetes de tal forma que no se cree una corriente demasiado fuerte en un lado u otro de la pila.
- Colocar las pilas de la misma altura seguidas para no crear turbulencias en las partes altas.
- Colocar las sondas prioritariamente en las pilas del medio del secadero. Se prefiere colocarlas sobre la penúltima fila contando desde abajo (véase la siguiente imagen).

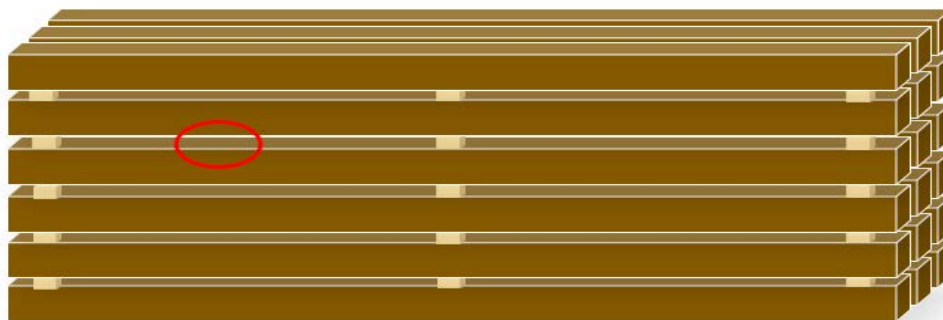


Figura 29: Colocación de las sondas: Ejemplo de posible colocación de las sondas (CRITTBois, 2018)

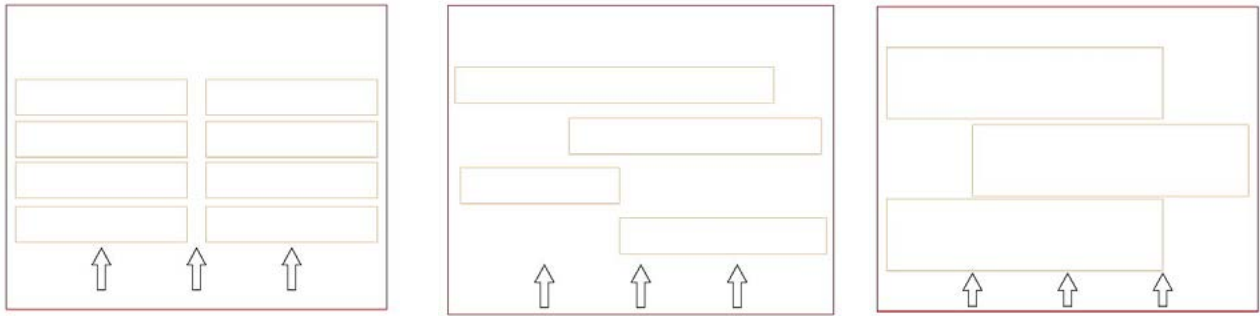
- Se prefiere colocar las sondas en el corazón y en la superficie.
- Poner las sondas entre las maderas del corazón, perpendicularmente a la fibra de la madera y sin atravesar la madera con una separación de unos 2,5 cm. Hay que prever agujeros de perforación más pequeños que el diámetro de las sondas.



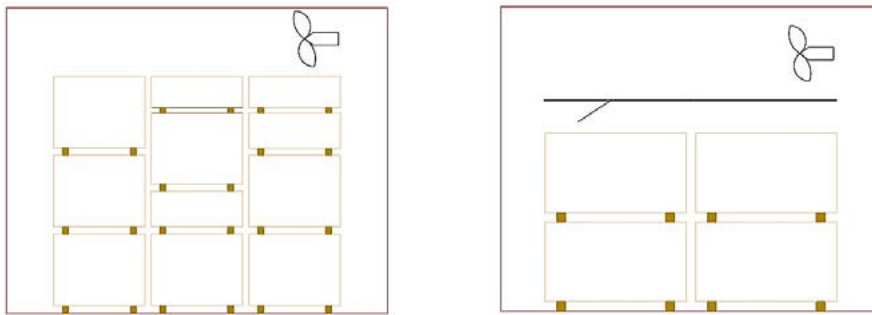
Figura 30: Sondas colocadas perpendicularmente al sentido de la fibra de la madera debajo de la antepenúltima fila de un paquete. (CRITTBois, 2018)

Nota: Es preferible hacer un pretaladrado con la ayuda de un taladro en las piezas de madera en vez de usar un martillo o masilla para fijar las sondas. Este método nos permite ganar en precisión.

Colocación correcta

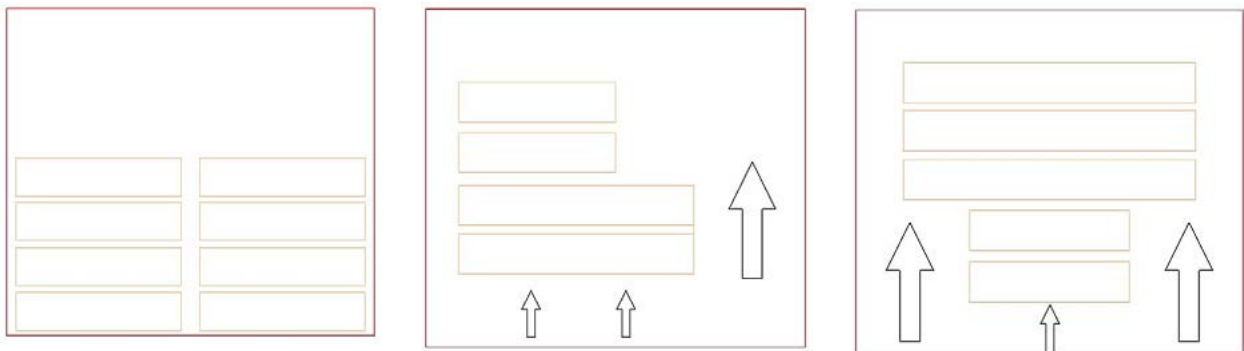


Vista desde arriba – Colocación correcta

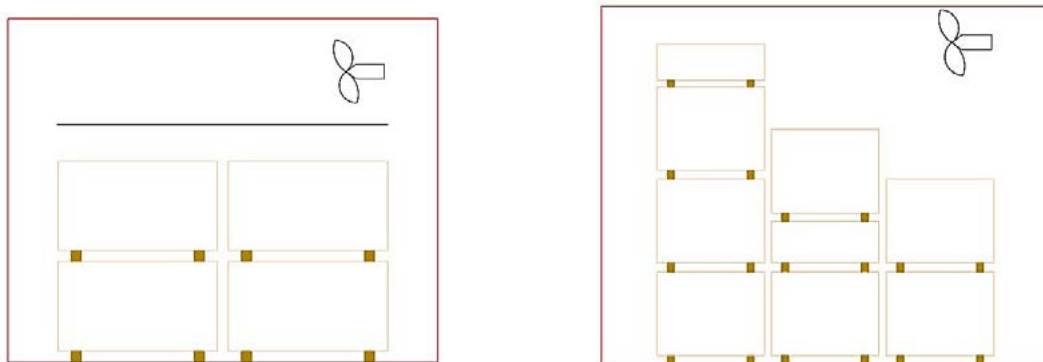


Vista de frente - Colocación correcta

Colocación incorrecta



Vista desde arriba – Colocación incorrecta



Vista de frente - Colocación incorrecta

Figura 31: Colocación de paquetes: buenas y malas prácticas (CRITTBois, 2018) dares (G. Gandon, OLERGIE).



7. Ciclos de secado

Los secaderos se pueden configurar a través de los programas de secado. Estos programas se definen por los siguientes aspectos:

- La especie de madera.
- El grosor.
- El método de secado.
- La humedad inicial.
- La humedad final.

En algunos casos, también estarán definidos según la procedencia de la madera, su calidad, un pedido específico del cliente, etc.

Estos programas siguen obligatoriamente un proceso que comprende seis «ciclos de secado» que se suceden en este orden:

- Pre calentamiento 1.
- Pre calentamiento 2 (calentamiento del corazón).
- Secado 1 ($H (\%) > PSF$).
- Secado 2 ($H (\%) \leq PSF$).
- Equilibrado (Estabilización).
- Enfriamiento.

Los diferentes ciclos están representados en las tablas de secado.

8. Tablas de secado

Las tablas de secado a menudo se representan como la de la Tabla 9. Recordamos que cada tabla hay que utilizarla en relación con una especie y grosores específicos, un método concreto y unas humedades iniciales y finales dadas.

Tabla 9: Tabla en blanco de secado tradicional

1	2	3	4	5	6
	PROGRAMA	Duración ciclo (horas)	HR (%) (Humedad en corazón (sonda))	T (°C)	HE (%)
S1	Precalentamiento 1				
S2	Precalentamiento 2				
S3	Secado 1				
S4	Secado 2				
S5	Equilibrado				
S6	Enfriamiento				

Explicación: Los programas se definen según varios parámetros. La columna 3 nos proporciona la duración del ciclo en horas. La columna 4, el índice de humedad de la madera transmitida por las sondas. Se puede tomar el valor medio de todas las sondas colocadas en el secador o bien la sonda con el valor medio más alto o más bajo según sea el caso. Nótese que es importante colocar las sondas en el corazón y en la superficie y se aconseja descartar las sondas que muestren resultados incongruentes.

Las dos últimas columnas nos proporcionan la temperatura que debe haber en la cámara y la humedad de equilibrio idónea.



9. Manejo del secado

El secadero de madera se controla fijando la humedad de equilibrio de la madera o al fijar la humedad relativa del aire. Para determinar la humedad de equilibrio, se pueden usar las curvas de equilibrio higroscópico de la madera (curvas de Keylwerth) que proporcionan la humedad de equilibrio en función de la humedad relativa y la temperatura.

Una vez que se ha elegido el programa de secado adecuado y se ha iniciado el ciclo, les aconsejamos controlar con regularidad el desarrollo del secado e intervenir en caso de que algo no fuese como debiera. En algunas empresas que secan madera de frondosas, se controla cada dos horas. En otras empresas nunca se hace un seguimiento. Sin embargo, el ordenador de control proporciona información y se pueden conseguir gráficos en directo. En concreto, algunos fabricantes pueden proporcionar las curvas y controlar que nuestros requisitos se estén respetando.

De todas formas, el rigor y la experiencia son la única garantía de un secado optimizado. Quien lleve a cabo el secado, si no se ha formado en un principio en esta actividad, debe aprender y empaparse de las bases teóricas de la madera y las bases teóricas del secado. Esta formación e implicación serán la garantía de un correcto secado y del control de la calidad.

Véase a continuación, una propuesta de ficha de seguimiento de secado de CRITT.

Tabla 10: Ficha de seguimiento de secado (CRITTBois, 2018)

Nº de Secadero:									
Inicio del secado:					Fin del secado:				
Especie:					Grosor:				
Tipo de enrastrelado:					Grosor:				
Volumen de madera seca:									
Fecha	Hora	Sondas					T (°C)	HE (%)	Observaciones
		S2	S3	S4	S5	S6			



10. Almacenamiento postsecado

A menudo se plantea la siguiente cuestión: ¿La madera que se ha secado al 8 – 10% o al 12%, va a quedarse en este índice de humedad si a la salida del secadero no la vamos a utilizar enseguida?

Como se ha mencionado varias veces en esta guía, la madera nunca es totalmente estable porque es un material higroscópico que pierde o gana humedad según el ambiente que la rodee. Para conservar la madera al índice de humedad que hemos conseguido al final del secado, hay que conservarla en un ambiente que reúna las características de temperatura e higrometría que correspondan a esa humedad.

- En pequeñas empresas, la poca cantidad de madera que se seca se puede almacenar en el taller, donde en general hay un aire relativamente seco (a veces incluso demasiado para los usos exteriores).
- En las grandes empresas, esto supone un verdadero problema. Lo ideal sería tener un espacio climatizado. Si la empresa tiene un almacén, esto se puede llevar a cabo con un coste bajo. Habría que distribuir, sobre el espacio, filas de tubos con aletas que mantendrán, durante los periodos de frío, una cierta humedad y un aire más seco que el de fuera. Al contrario debe hacerse en verano, humidificando la atmósfera colocando en el techo del almacén difusores de humedad (vapor o agua pulverizada). La tabla «VII – Tabla de humedades de equilibrio» de la página 77, muestra en verde, para temperaturas entre los 15 °C y 25 °C, las humedades relativas a alcanzar para conseguir unos índices de humedad de entre el 8% y el 11%.
- En el caso de aserraderos o negocios de madera, el secado de madera a humedades bajas (inferiores a la humedad de equilibrio del aire que tendría la madera mientras esté almacenada) no sirve de nada si no se entrega inmediatamente al cliente.

Para mayores tiempos de secado, se aconseja deshacer las pilas de madera y volverlas a apilar tabla sobre tabla con el objetivo de limitar la recuperación de humedad. Además, así reduciremos el volumen de los paquetes. Este método, aunque tiene el inconveniente de requerir mucho tiempo de manipulación, es eficaz contra la recuperación de humedad.



V. El secado de especies pirenaicas

1. Preámbulo

En este último capítulo vamos proporcionar los datos sobre el secado de las especies pirenaicas que nos interesan.

Los datos mostrados a continuación se presentan a título informativo y hay que validarlos aplicándolos adecuadamente. Se da por sentado que contentarse o limitarse a estos datos no garantizará un secado de calidad puesto que el secado de la madera agrupa las operaciones anteriores al secado (secado natural, enrastrelado y otras) y operaciones de postsecado (lugar y condiciones climáticas de almacenado, transporte...).

Estos datos provienen de los comentarios de varias empresas y de bibliografía de un fabricante francés de secaderos con sistema de aire acondicionado caliente (Cathild®). Nosotros hemos elegido voluntariamente presentarles estos datos exclusivamente para el secado por el sistema de aire acondicionado caliente ya que esta tecnología representa el 75% o hasta incluso el 80% de los secaderos.

2. Notas

Nota 1: Para el conjunto de tablas, la humedad de equilibrio de la fase de equilibrado debe calcularse así: **HE = 0,85 x H% final.**

Nota 2: La fase de enfriamiento no tiene una duración fija puesto que depende de la temperatura exterior. Hay que dejar la madera dentro del secadero si la diferencia entre la temperatura exterior y la temperatura de la madera es superior a los 30 °C.

Nota 3: Estas tablas no sirven para los secaderos al vacío porque el parámetro de presión no se considera. Les aconsejamos adaptar los siguientes datos con los datos del proveedor de su secadero.

Nota 4: No se ha incluido la velocidad de los ventiladores (velocidad del aire) porque este dato depende mucho del secadero que usted utilice e incorporar este dato sería contraproducente.

3. Roble de los Pirineos

A. Propiedades físicas y mecánicas del roble.

A continuación, presentamos las propiedades físicas y mecánicas del roble según los ensayos estandarizados en varias muestras sacadas de las fichas TROPIX © du CIRAD.

Tabla 11: Características físicas y mecánicas del roble

Características	Resultados
Masa volumétrica (*)	740 kg/m ³
Módulo de elasticidad (*)	13 300 Mpa
Resistencia a la rotura a flexión (*)	105 MPa
Resistencia a la rotura a compresión axial (*)	58 MPa
Dureza Monnin (*)	4,2 (mi-dur)
Contracción tangencial (H% = 0% en PSF)	9,7 %
Contracción radial (H% = 0% en PSF)	4,5 %
Punto de saturación de fibras (PSF)	31%

(*)Propiedades determinadas sobre maderas al 12%

Además, la norma NF B 52-001-1, que se acaba de revisar (14 de abril de 2018), nos da la correspondencia entre las categorías visuales y los tipos de resistencias mecánicas para el roble:

Tabla 12: Correspondencia entre las calidades visuales y clases resistentes del roble (AFNOR, 2018)

Calidad visual según NF B 52 001-1	Clase resistente según NF EN 338
1	D30
2	D24
3	D18

Para más información sobre las combinaciones, véase la norma NF B 52-001-1 (04/18)

B. Propiedades relativas al secado del roble de los Pirineos

Velocidad de secado: Lenta.

Riesgo de deformación: Alto.

Riesgo de cimentación: No.

Riesgo de agrietado: Alto.

Riesgo de colapso: Sí.

Esta especie hay que secarla lentamente y con precaución.



C. Tabla de secado del roble de los Pirineos (grosor de 27 a 35 mm)

PROGRAMA Roble de los Pirineos		Duración ciclo (horas)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Pre calentamiento 1			26	16,0
2	Pre calentamiento 2	3		27	16,0
3	Secado 1		> 50	28	15,0
			50-40	28	14,0
			40-35	28	13,5
			35-30	28	12,5
4	Secado 2		30-27	29	11,0
			27-24	35	10,0
			24-21	40	8,5
			21-18	45	7,5
			18-15	53	6,5
			15-12	58	6,0
			12-09	61	5,0
5	Equilibrado	8		54	
6	Enfriamiento			30	

(Cathild®)

D. Explicación para el roble de los Pirineos

Tabla 13: Detalles ciclo por ciclo del roble de los Pirineos (CRITTBois, 2018)

Ciclo	Nombre	Descripción
Ciclo 1/6	Pre calentamiento 1	Este ciclo consiste en aumentar lentamente la temperatura hasta 26 °C.
Ciclo 2/6	Pre calentamiento 2	Se aumenta la temperatura ligeramente a 27 °C y aumentamos la velocidad de ventilación. Este ciclo bastante corto debe permitir que se evite el endurecimiento y también los fenómenos de coloración.
Ciclo 3/6	Secado 1 (H (%) > PSF)	El secado 1 permite bajar lentamente la humedad en el corazón al 30% (PSF) a una temperatura de 28 °C.
Ciclo 4/6	Secado 2 (H (%) ≤ PSF)	Una vez se llega al PSF aumentamos la temperatura progresivamente con el fin de bajar la humedad en el corazón.
Ciclo 5/6	Equilibrado (Estabilización)	Equilibramos las maderas con un índice de humedad anhidra inferior a 0,8 - 0,9 veces el índice de humedad de equilibrio deseado. Ejemplo: Si desean la madera a un Hf = 14%, durante el ciclo 5 programarán un índice de H=0,85 x 14, o sea, H= 11,9%.
Ciclo 6/6	Enfriamiento	Bajamos la temperatura en el interior del secadero de manera que tengamos una diferencia de temperatura de 30 °C entre la temperatura exterior y la de la madera en el secadero. Ejemplo: Text = 5 °C. Podemos parar este último ciclo de secado cuando la madera tenga una temperatura de 35 °C.

4. Haya

A. Propiedades físicas y mecánicas del haya

A continuación, presentamos las propiedades físicas y mecánicas del haya según los ensayos estandarizados mediante varias muestras sacadas de las fichas TROPIX © du CIRAD.

Tabla 14: Características físicas y mecánicas de la haya

Características	Resultados
Masa volumétrica (*)	710 kg/m ³
Módulo de elasticidad (*)	15 300 Mpa
Resistencia a la rotura a flexión (*)	111 MPa
Resistencia a la rotura a compresión axial (*)	57 MPa
Dureza Monnin (*)	4,2 (mi-dur)
Contracción tangencial (H% = 0% en PSF)	11,6 %
Contracción radial (H% = 0% en PSF)	5,7 %
Punto de saturación de fibras (PSF)	32%

(*) Propiedades determinadas sobre maderas estabilizadas al 12%

Además, la norma NF B 52-001-1 que se acaba de revisar (14 de abril de 2018), nos da la correspondencia entre las calidades visuales y las clases resistentes para el haya:

Tabla 15: Correspondencia entre las calidades visuales y las clases resistentes para el haya (AFNOR, 2018)

Calidad visual según NF B 52 001-1	Clase resistente según NF EN 338	
Combinación 1 (H1 + H3)	H1	D40
	H3	D24
Combinación 1 (H2 + H4)	H2	D35
	H4	D18

Para más información sobre las combinaciones, véase la norma NF B 52-001-1 (04/18)

B. Propiedades relativas al secado del haya

Velocidad de secado: Lenta.

Riesgo de deformación: Alto.

Riesgo de cimentación: Sí.

Riesgo de agrietado: Alto.

Riesgo de colapso: Sí.

Esta especie es sensible al azulado.



C. Tabla de secado del haya (grosor de 27 a 35 mm)

	PROGRAMA Haya	Duración ciclo (horas)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Precalentamiento 1			50	17,0
2	Precalentamiento 2	4		50	16,5
3	Secado 1		> 50	53	15,2
			50-40	53	14,1
			40-35	54	13,9
			35-30	55	12,5
4	Secado 2		30-27	57	11,0
			27-24	58	9,4
			24-21	59	7,9
			21-18	61	7,3
			18-15	62	6,1
			15-12	62	5,6
			12-09	72	5,0
5	Equilibrado	8		55	
6	Enfriamiento			30	

(Cathild®)

5. Abeto

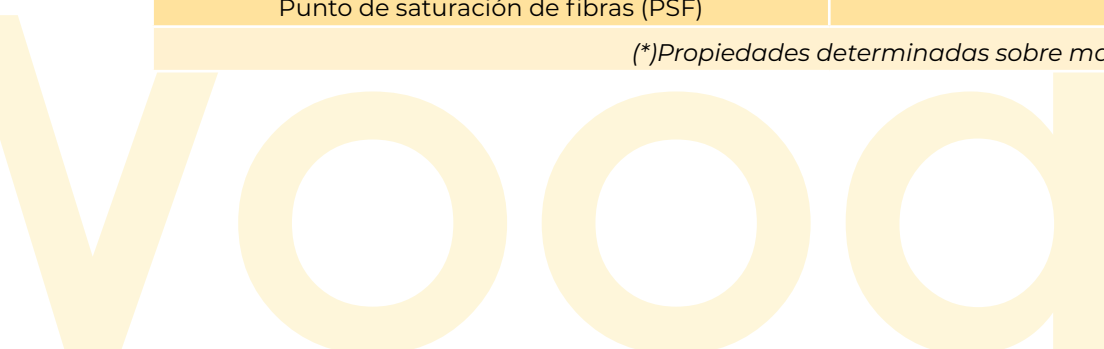
A. Propiedades físicas y mecánicas del abeto

A continuación, presentamos las propiedades físicas y mecánicas del abeto según los ensayos estandarizados en varias muestras sacadas de las fichas TROPIX © du CIRAD.

Tabla 16: Características físicas y mecánicas del abeto

Características	Resultados
Masa volumétrica (*)	490 kg/m ³
Módulo de elasticidad (*)	14 300 Mpa
Resistencia a la rotura a flexión (*)	80 MPa
Resistencia a la rotura a compresión axial (*)	41 MPa
Dureza Monnin (*)	2,5 (blanda)
Contracción tangencial (H% = 0% en PSF)	8,7 %
Contracción radial (H% = 0% en PSF)	4,0 %
Punto de saturación de fibras (PSF)	29%

(*)Propiedades determinadas sobre maderas estabilizadas al 12%



Además, la norma NF B 52-001-1, que se acaba de revisar (14 de abril de 2018), nos da la correspondencia entre las calidades visuales y las clases resistentes para el abeto:

Tabla 17: Correspondencia entre las calidades visuales y las clases resistentes para la haya (AFNOR, 2018)

Calidad visual y clase resistente Especie	ST-I	ST-II	ST-III	ST-IV
Abeto	C30	C24	C18	-

B. Propiedades relativas al secado del abeto

Velocidad de secado: Rápida.

Riesgo de deformación: Alto.

Riesgo de cimentación: No se conocen riesgos.

Riesgo de agrietado: Alto.

Riesgo de colapso: No.

C. Tabla de secado del abeto (grosor de 27 a 35 mm)

	PROGRAMA Abeto	Duración ciclo (horas)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Precalentamiento 1			50	14
2	Precalentamiento 2	6		55	12,5
3	Secado 1		> 50	62	12
			50-40	62	11,5
			40-35	62	10
			35-30	62	9
4	Secado 2		30-27	65	8
			27-24	65	7,5
			24-21	65	7
			21-18	65	6,5
			18-15	65	6
			15-12	67	5
			12-09	70	4
			09-06	70	3,5
5	Equilibrado	12		54	
6	Enfriamiento			30	

(Cathild®)

D. Explicación para el abeto

Tabla 18: Detalles ciclo por ciclo del abeto (CRITTBois, 2018)

Ciclo	Nombre	Desarrollo
Ciclo 1/6	Pre calentamiento 1	Este ciclo permite aumentar lentamente la temperatura hasta 50 °C.
Ciclo 2/6	Pre calentamiento 2	Aumentamos la temperatura hasta 55 °C y aumentamos la velocidad de ventilación.
Ciclo 3/6	Secado 1 (H (%) > PSF)	El secado 1 permite bajar la humedad en el corazón hasta el 30% (PSF) estabilizando la temperatura alrededor de 62 °C.
Ciclo 4/6	Secado 2 (H (%) ≤ PSF)	Una vez se llega al PSF, aumentamos la temperatura progresivamente hasta los 65 °C con el fin de bajar la humedad en el corazón hasta entre el 15% y el 18%.
Ciclo 5/6	Equilibrado (Estabilización)	Equilibramos las maderas con un índice de humedad en base anhidra inferior a 0,8 - 0,9 veces el índice de humedad de equilibrio deseado. Ejemplo: Si desean la madera a un $H_f = 14\%$, durante el ciclo 5 apuntarán a un índice de $H = 0,85 \times 14$, o sea, $H = 11,9\%$.
Ciclo 6/6	Enfriamiento	Bajamos la temperatura en el interior del secadero de manera que tengamos una diferencia de temperatura de 30 °C entre la temperatura exterior y la temperatura de la madera en el secadero. Ejemplo: $T_{ext} = 5\text{ °C}$. Podremos parar este último ciclo de secado cuando la madera tenga una temperatura de 35 °C.

6. Pino silvestre

A. Propiedades físicas y mecánicas del pino silvestre

A continuación, presentamos las propiedades físicas y mecánicas del pino silvestre según los ensayos estandarizados en varias muestras sacadas de las fichas TROPIX © du CIRAD.

Tabla 19: Características físicas y mecánicas del pino silvestre

Características	Resultados
Masa volumétrica (*)	550 kg/m ³
Módulo de elasticidad (*)	12 900 Mpa
Resistencia a la rotura a flexión (*)	105 MPa
Resistencia a la rotura a compresión axial (*)	58 MPa
Dureza Monnin (*)	2,6 (blanda)
Contracción radial (H% = 0% en PSF)	9,7 %
Contracción radial (H% = 0% en PSF)	4,5 %
Punto de saturación de fibras (PSF)	30 - 31%

(*)Propiedades determinadas sobre maderas estabilizadas al 12%

Además, la norma NF B 52-001-1, que se acaba de revisar (14 de abril de 2018), nos da la correspondencia entre las calidades visuales y clases resistentes para el pino silvestre:

Tabla 20: Correspondencia entre las calidades visuales y las clases resistentes para el pino silvestre (AFNOR, 2018)

Calidad visual y clase resistente Especie	ST-I	ST-II	ST-III	ST-IV
Pino silvestre	C30 ¹⁾	C24	C18	C14 ¹⁾

¹⁾ Estas categorías no están catalogadas en la NF EN 1912 (Maderas de estructura – Tipos de resistencias – Asignación de categorías visuales y especies)

B. Propiedades relativas al secado del pino silvestre

Velocidad de secado: De rápida a normal.

Riesgo de deformación: Poco elevado.

Riesgo de cimentación: No.

Riesgo de agrietado: Poco elevado.

Riesgo de colapso: No.

C. Tabla de secado del pino silvestre (grosor de 27 a 35 mm)

	PROGRAMA Pino silvestre	Duración ciclo (horas)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Pre calentamiento 1			60	14,0
2	Pre calentamiento 2	3		65	12,0
3	Secado 1		> 50	68	10,0
			50-40	70	9,1
			40-35	70	8,7
			35-30	70	7,9
4	Secado 2		30-27	72	7,0
			27-24	72	6,3
			24-21	75	5,5
			21-18	75	4,9
			18-15	75	4,3
			15-12	80	3,9
			12-09	80	3,4
			09-06	80	3,2
5	Equilibrado	6		73	
6	Enfriamiento				

(Cathild®)



7. Pino radiata

El pino radiata está, junto al pino negro, entre las especies de las que menos información tenemos sobre sus propiedades y características de secado. Sin embargo, gracias a varios trabajos realizados en estos últimos años, hemos podido saber un poco más sobre esta especie.

A. Propiedades físicas y mecánicas del pino radiata

A continuación, presentamos las propiedades físicas y mecánicas del pino radiata según los datos aportados por una página web neozelandesa, www.nzwood.co.nz/.

Tabla 21: Características físicas y mecánicas del pino radiata

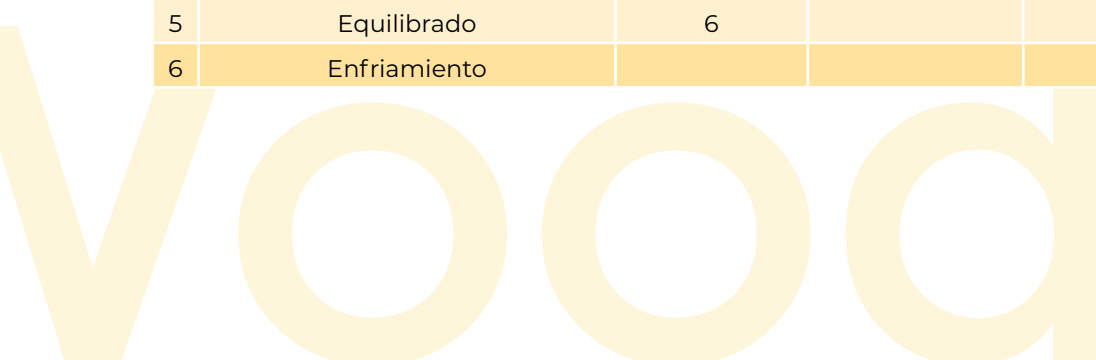
Características	Resultados
Masa volumétrica (*)	460 à 560 kg/m ³
Módulo de elasticidad (*)	8 300 Mpa
Resistencia a la rotura a flexión (*)	85,8 MPa
Resistencia a la rotura a compresión axial (*)	36,8 MPa
Dureza Monnin (*)	1,6 à 2,2 (tendre)
Punto de saturación de fibras (PSF)	35%

(*)Propiedades determinadas sobre maderas estabilizadas al 12%

B. Tabla de secado del pino radiata (grosor de 27 a 35 mm)

PROGRAMA Pino radiata	Duración ciclo (horas)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Precaletamiento 1		65	14,0
2	Precaletamiento 2	3	70	12,0
3	Secado 1	> 50	73	10,0
		50-40	75	9,1
		40-35	75	8,7
		35-30	75	7,9
4	Secado 2	30-27	77	7,0
		27-24	77	6,3
		24-21	78	5,5
		21-18	78	4,9
		18-15	80	4,3
		15-12	80	3,9
		12-09	80	3,4
		09-06	80	3,2
5	Equilibrado	6	73	
6	Enfriamiento		58	

(Cathild®)



8. Pino negro

El pino negro, de las 6 especies que se trabajan en esta guía, es la especie de la que menos información tenemos sobre sus propiedades y características de secado. A título informativo, no existe una tabla de secado para esta especie. Sin embargo, gracias a varios trabajos realizados en estos últimos años, hemos podido saber un poco más sobre esta especie.

A. Propiedades físicas y mecánicas del pino negro

A continuación, presentamos las propiedades físicas y mecánicas del pino negro según los ensayos estandarizados en varias muestras procedentes de 9 áreas diferentes de los Pirineos catalanes (Francia) dentro del proyecto UNCI'PLUS.

Tabla 22: Características físicas y mecánicas del pino negro (CENTRE TECHNOLOGIE FORESTAL DE CATALUNYA, 2012)

Características	Resultados
Masa volumétrica (*)	474 à 526 kg/m ³
Módulo de elasticidad (*)	10 300 à 13 500 Mpa
Resistencia a la rotura a flexión (*)	87,7 à 102,7 MPa
Resistencia a la rotura a compresión axial (*)	40,5 à 45,8 MPa
Dureza Monnin (*)	1,6 à 2,2 (tendre)
Contracción tangencial (H% = 0% en PSF)	7,8% à 8,9%
Contracción radial (H% = 0% en PSF)	3,5% à 4,5%
Punto de saturación de fibras (PSF)	27,4% à 29,1%

(*)Propiedades determinadas sobre maderas estabilizadas al 12%

Además, la norma NF B 52-001-1, que se acaba de revisar (14 de abril de 2018), nos da la correspondencia entre las calidades visuales y las clases resistentes para el pino negro:

Tabla 23: Correspondencia entre las calidades visuales y las clases resistentes para el pino negro (AFNOR, 2018)

Especie	Calidad visual y clase resistente			
	ST-I	ST-II	ST-III	ST-IV
Pino negro catalán	C22 ¹⁾	C18 ¹⁾	C18 ¹⁾	C14 ¹⁾

¹⁾ Estas categorías no están catalogadas en la NF EN 1912 (Maderas de estructura – Tipos de clases resistentes – Asignación de calidades visuales y especies)



B. Nuestros consejos para la tabla de secado del pino negro

No existe tabla de secado para esta especie. Mientras estemos en esta situación, es útil encontrar una especie que tenga propiedades físicas y mecánicas similares y utilizar su tabla de secado de manera «flexible». Después, a medida que pasen los ciclos de secado, iremos ajustando con más precisión los parámetros en función de los problemas o defectos encontrados durante los ciclos anteriores. Esta es la única manera en que se podrá confeccionar una tabla de secado para esta especie.

A partir de nuestras investigaciones y hallazgos no hemos encontrado información que nos pudiera orientar en la manera de secar esta especie.

A pesar de ello, proponemos una tabla de secado para el pino negro. Volvemos a recordar que los siguientes datos se muestran a título indicativo y deben validarse aplicándolos adecuadamente. Se da por sentado que contentarse o limitarse a estos datos no garantizan un secado de calidad puesto que el secado de la madera agrupa las operaciones anteriores al secado (secado natural, enrastrelado y otras) y operaciones postsecado (lugar y condiciones climáticas de almacenado, transporte...).

	PROGRAMA Pino negro	Duración del ciclo (horas)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Pre calentamiento 1			60	14,0
2	Pre calentamiento 2	3		65	12,0
3	Secado 1		> 50	68	10,0
			50-40	70	9,1
			40-35	70	8,7
			35-30	70	7,9
4	Secado 2		30-27	72	7,0
			27-24	72	6,3
			24-21	75	5,5
			21-18	75	4,9
			18-15	75	4,3
			15-12	75	3,9
			12-09	77	3,4
			09-06	77	3,2
5	Equilibrado	6		73	
6	Enfriamiento				







VI - Resumen de buenas prácticas y nuestros consejos

1. Medición de la humedad

Les aconsejamos para el uso cotidiano el empleo de métodos eléctricos por su rapidez. Las medidas tienen que efectuarse correctamente para evitar el riesgo de obtener valores erróneos. No se olviden de respetar los siguientes elementos:

- La elección de la especie de madera.
- La temperatura de la madera.
- Utilizar electrodos con puntas aisladas eléctricamente hasta sus extremos.
- Los electrodos deben colocarse perpendicularmente a las fibras de la madera.
- Por cada pieza de madera, primero hay que realizar una medida en la superficie para obtener la H_s y después una medida en el corazón para el H_c . Así calculamos el gradiente de humedad G_h con el fin de conocer la homogeneidad.
- Completar las fichas de seguimiento con los valores calculados y leídos de varias muestras de una partida o lote.

Recordatorio: Acuérdesse de que un resultado superior al 35% no significará nada puesto que el aparato solo es preciso en el rango 6% - 35%. Solo el método por pesada le dará un resultado ajustado en todos los rangos.

2. Apilado y enrastrelado

Estemos ante el secado al aire libre o el artificial, deben respetarse los siguientes elementos:

❖ Rastreles.

Los rastreles deben:

- Estar secos (de $H=15\%$ a 18% máximo).
- Ser de pino o de maderas frondosas blandas y sin albura.
- Estar lo más rectos posible.

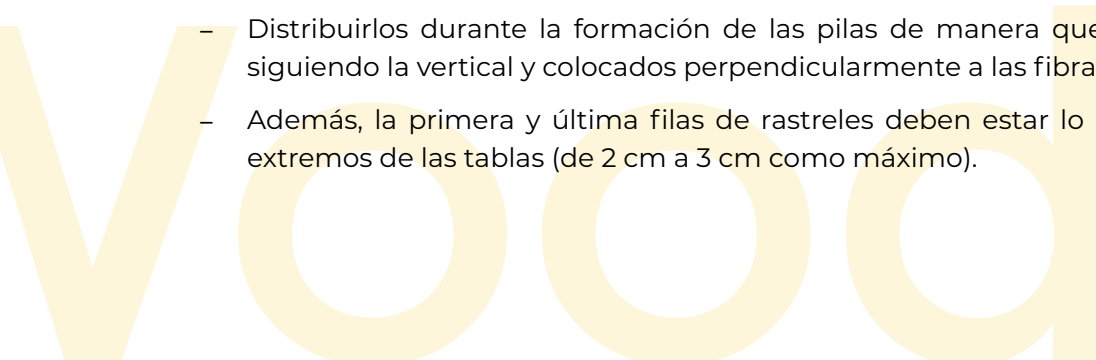
❖ El lote de madera a secar.

Las piezas de madera a secar deben:

- Ser de la misma especie y del mismo grosor.
- Tener un índice de humedad inicial lo más homogéneo posible

❖ Enrastrelado.

- Distribuirlos durante la formación de las pilas de manera que queden bien alineados, siguiendo la vertical y colocados perpendicularmente a las fibras de la madera.
- Además, la primera y última filas de rastreles deben estar lo más cerca posible de los extremos de las tablas (de 2 cm a 3 cm como máximo).



- Para el **secado al aire libre**, intente respetar el grosor de los rastreles y la separación entre ellos de acuerdo con la siguiente tabla:

Grosor de las maderas (mm)	Grosor de los rastreles (mm)	Separación de los rastreles (cm)
de 18 a 20	20	30 à 40
de 20 a 35	25	40 à 50
de 40 a 50	30	50 à 60
de 50 a 65	35	70 à 80
de 65 a 80	40	90
Más de 80	45	100

Además, es necesario favorecer la circulación vertical del aire puesto que su velocidad es bajadejando espacios de entre 1 cm y 5 cm entre las piezas de madera.

- Para el **secado artificial**, intente respetar el grosor de los rastreles y la separación entre ellos de acuerdo con la siguiente tabla:

Grosor (G) de las piezas (mm)	Grosor (g) de los rastreles (mm)	Separación (s) de las filas (cm)
$G < 30$	$18 < \mathbf{g} < 20$ <i>Exemple : 20mm</i>	$40 < \mathbf{s} < 60$ <i>Exemple : 50cm</i>
$30 < G < 55$	$20 < \mathbf{g} < 27$ <i>Exemple : 25mm</i>	$60 < \mathbf{s} < 100$ <i>Exemple : 80cm</i>
$55 < G < 80$	$27 < \mathbf{eg} < 35$ <i>Exemple : 30mm</i>	$80 < \mathbf{s} < 150$ <i>Exemple : 100cm</i>
$G > 80$	$\mathbf{g} = 35$	$100 < \mathbf{s} < 150$ <i>Exemple : 120cm</i>

A diferencia del secado natural, se aconseja hacer el apilado sin dejar espacios entre las partidas.

3. Antes de llenar el secadero

- Comprobar las boquillas de humidificación y limpiarlas con agua con vinagre si fuese necesario.
- Limpiar las sondas quitando toda la suciedad porque si no se podrían falsear las medidas.
- Cambiar los papeles secantes (medida de la humedad de equilibrio) antes de cada ciclo de secado (véase la siguiente imagen).
- Posicionar las pilas de manera que el flujo de aire incida perpendicularmente sobre las fibras de la madera.
- Poner las maderas más húmedas al fondo del secadero o en la parte de delante del secadero.
- Poner las maderas más secas en el medio de la cámara.
- Aunque no somos muy favorables a mezclar los grosores, en caso de que haya que hacerlo, poner los grosores menores en medio de la cámara.



- Colocar los paquetes de tal forma que no se cree una corriente demasiado fuerte en un lado u otro de la pila.
- Colocar las pilas de la misma altura seguidas al final para no crear turbulencias en las partes superiores.
- Colocar las sondas prioritariamente en las pilas del medio del secadero. Es preferible colocarlas sobre la penúltima pila contando desde abajo.
- Se prefiere colocar las sondas en el corazón y en la superficie.
- Poner las sondas entre las maderas del corazón, perpendicularmente a las fibras de la madera, sin atravesar la piezas y con una separación de unos 2,5 cm. Previamente, pretaladrar agujeros más pequeños que el diámetro de las sondas.

¡Haga un seguimiento con regularidad y aprenda de los errores y de los aciertos!

4. Realización del secado

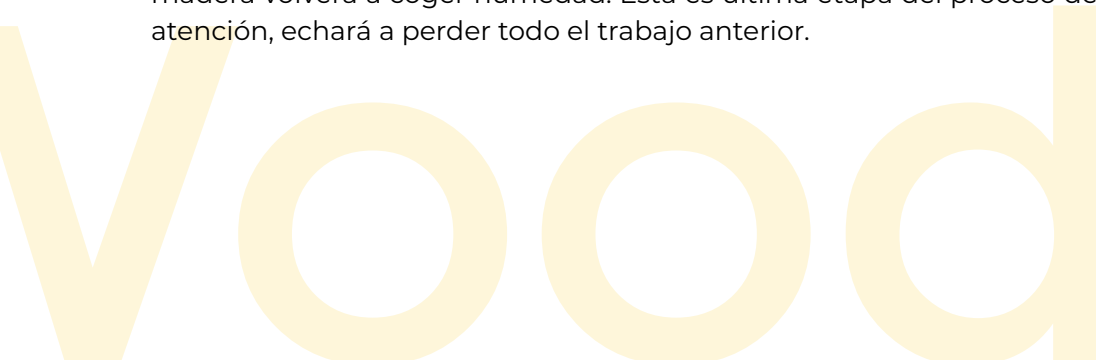
¡Haga un seguimiento con regularidad y aprenda de los errores y de los aciertos!

N° Secadero:											
Inicio del secado:								Fin del secado:			
Especie:								Grosor:			
Tipo de enrastrelado:								Grosor:			
Volumen de madera secada:											
Fecha	Hora	Sondas					T (°C)	HE (%)	Comentarios		
		S2	S3	S4	S5	S6					

No se olvide de controlar el gradiente de secado, parámetro que debe permanecer casi constante durante el proceso de secado.

5. Después del secado

Dominar el proceso de secado no es solo controlar la operación de secado. Se necesita integrar en el proceso los tiempos en los que la madera está inmovilizada porque, durante este periodo, la madera volverá a coger humedad. Esta es última etapa del proceso de secado, si no se le presta atención, echará a perder todo el trabajo anterior.





6. Incidentes y problemas de funcionamiento

Los incidentes de funcionamiento de los secaderos son de dos tipos:

- El reglaje de datos es preciso pero no son correctamente ejecutados por parte de los encargados del calibrado y los ajustes.
- Los reglajes no funcionan correctamente y se introducen datos que no corresponden con los que se muestran.

Antes de llamar al servicio de mantenimiento o de culpar a los reglajes, en primer lugar les aconsejamos comprobar algunos puntos. Vamos a citar unos ejemplos de las incidencias más corrientes para respaldar esos diferentes puntos:

- La temperatura no sube:
 - Hay que purgar los tubos calientes del sistema de baterías de aletas. Se percibe cuando solo una parte de los tubos está caliente.
 - La válvula de calefacción puede bloquearse quedando cerrada o a medio abrir.
 - Los purgadores no funcionan bien.
 - Los filtros están obstruidos.
- La humedad relativa del aire en el secadero no se mantiene a un nivel alto. Entonces el aire es demasiado seco:
 - El sistema de humidificación está obstruido total o parcialmente.
 - Las compuertas de las ventanas están bloqueadas en posición abierta.
 - Hay fugas en las puertas de acceso al secadero.
- El aire es demasiado húmedo:
 - El sistema de humidificación está abierto.
 - Las compuertas de las ventanas no se abren.

7. Consejos y mantenimiento

La tecnología puede tener sus límites e igualmente a veces les puede faltar el tiempo. En estos dos casos, no hay que seguir adelante con un proceso de secado incorrecto. Su proveedor le puede ayudar a la resolución de problemas materiales e incluso algunos garantizan la asistencia entre 24 h y 48 h.

Los estudios u oficinas de ingeniería también le pueden guiar u ocuparse del análisis y de darle soluciones respecto a sus problemas con el secado.

VII - Tabla de humedades de equilibrio

Temperatura (°C)	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C	80 °C	
Humedad de equilibrio Heq (%)																		
5 %	1,45	1,49	1,52	1,53	1,53	1,53	1,51	1,49	1,46	1,42	1,37	1,33	1,28	1,22	1,17	1,11	1,05	
10 %	2,64	2,69	2,72	2,74	2,73	2,71	2,67	2,62	2,56	2,49	2,41	2,32	2,24	2,14	2,05	1,95	1,85	
15 %	3,65	3,71	3,74	3,74	3,72	3,68	3,63	3,55	3,46	3,36	3,26	3,14	3,02	2,90	2,77	2,65	2,52	
20 %	4,56	4,62	4,64	4,63	4,60	4,54	4,46	4,37	4,25	4,13	4,00	3,86	3,71	3,56	3,41	3,26	3,11	
25 %	5,41	5,46	5,47	5,45	5,41	5,33	5,23	5,12	4,98	4,84	4,68	4,52	4,35	4,18	4,01	3,83	3,66	
30 %	6,21	6,26	6,27	6,24	6,17	6,08	5,97	5,83	5,68	5,51	5,34	5,15	4,96	4,77	4,58	4,39	4,20	
35 %	7,00	7,05	7,04	7,00	6,93	6,82	6,69	6,54	6,37	6,18	5,99	5,79	5,58	5,37	5,16	4,95	4,74	
40 %	7,80	7,84	7,83	7,78	7,69	7,57	7,43	7,26	7,07	6,87	6,66	6,44	6,21	5,98	5,76	5,53	5,30	
45 %	8,61	8,65	8,64	8,58	8,48	8,35	8,19	8,01	7,81	7,59	7,36	7,12	6,88	6,63	6,39	6,15	5,91	
50 %	9,46	9,50	9,48	9,42	9,31	9,17	9,00	8,81	8,59	8,36	8,11	7,86	7,60	7,34	7,08	6,82	6,56	
55 %	10,36	10,40	10,38	10,32	10,21	10,06	9,88	9,67	9,44	9,19	8,94	8,67	8,39	8,12	7,84	7,57	7,30	
60 %	11,33	11,37	11,36	11,29	11,18	11,03	10,84	10,62	10,38	10,13	9,85	9,57	9,29	9,00	8,71	8,42	8,14	
65 %	12,39	12,44	12,44	12,37	12,26	12,11	11,92	11,69	11,45	11,18	10,90	10,61	10,31	10,01	9,71	9,41	9,12	
70 %	13,56	13,63	13,64	13,59	13,48	13,33	13,14	12,92	12,67	12,40	12,11	11,81	11,51	11,20	10,89	10,59	10,28	
75 %	14,88	14,97	15,00	14,97	14,88	14,74	14,56	14,34	14,09	13,83	13,54	13,24	12,94	12,63				
80 %	16,38	16,52	16,58	16,57	16,51	16,39	16,23	16,03	15,80	15,54	15,27	14,98	14,69	14,39				
85 %	18,13	18,31	18,42	18,46	18,44	18,36	18,24	18,07	17,87	17,65	17,41	17,15	16,89	16,63				

Nota 1: Las humedades de equilibrio que se muestran aquí son el resultado de una fórmula matemática compleja que no es precisa para temperatura y humedades relativas demasiado altas. En consecuencia, los valores en **naranja** y **rojo** son menos precisos y se muestran como datos a título consultivo.

Nota 2: Los valores en **verde** corresponden a los rangos de temperatura normales en un taller y destacan las humedades relativas a controlar y a respetar con el fin de mantener los índices de humedad de las maderas entre el 8,5% y el 11% (carpintería) (véase página 34).

Nota 3: La utilización de esta tabla no reemplaza la utilización de las curvas de Keylwerth pero permiten obtener rápidamente la humedad de equilibrio en función de la temperatura y la humedad relativa del aire.





VIII - Terminología

A **Albura (Madera funcional):** Parte funcional del árbol que corresponde a las zonas de crecimiento formadas más recientemente y que contienen células vivas.

Anhidro: Que no contiene agua.

Anisótropo: Sustancias cuyas propiedades físicas varían en función de la dirección.

Agua de constitución: Parte integrante de la materia. Nunca se puede evacuar a lo largo del secado.

Agua libre (también llamada agua capilar): Rellena el lumen celular. Se puede extraer sin provocar variación dimensional. Cuando la madera se seca, el agua libre es la primera en salir.

Agua de impregnación (también llamada agua higroscópica): Impregna la pared celular. Al extraer el agua de impregnación se producen variaciones dimensionales (por debajo del 30% de humedad).

C **Cámbium:** Capa muy fina por donde circula la savia. Es la parte viva del árbol ya que aquí es donde se fabrican las fibras, los anillos y la corteza.

Contracción volumétrica: Es la suma de tres contracciones que definen la contracción lineal. Se define en % y es la relación entre la pérdida de volumen y el volumen anhidro.

Convección: Transferencia de calor acompañada del cambio de materia al estado líquido.

Corteza (corteza externa): Capa protectora del árbol formada de tejido vegetal. Es la parte que podemos tocar.

D **Duramen (Madera perfecta):** Parte muerta donde se acumulan los desechos y por la que ya no circula la savia. Es el esqueleto del árbol, un núcleo duro y resistente.

Dureza Monnin: La dureza Monnin es una medida tomada de una pieza de madera que contiene entre un 10% y un 12% de humedad. La dureza Monnin permite comprobar la resistencia a la penetración en la cara radial de la madera. Esta prueba se lleva a cabo con la ayuda de un cilindro metálico de longitud superior a 20 mm y de 30 mm de diámetro y aplicando una fuerza de 1960 Newton. El resultado de la prueba permite clasificar las especies de madera por su nivel de dureza.

G **Gradiente de secado:** Relación entre el índice de humedad de la madera mientras se seca y el equilibrio higroscópico de la madera. Dicho de otra manera, relación entre el índice de humedad indicado por las sondas y el equilibrio higroscópico indicado por el papel secante del secadero. Un gradiente de secado alto significa una gran intensidad de secado. Las maderas resinosas soportan un gradiente de secado más alto que las maderas frondosas.

Gradiente de humedad: Relación entre el índice de humedad más alto y el más bajo en el grosor de la madera. Para que una pieza de madera pueda ser utilizada en buenas condiciones debe tener un gradiente de humedad lo más bajo posible porque un gradiente demasiado alto a la salida del secadero es un defecto de secado.

H **Heterogéneo:** Dicho de las sustancias cuyas propiedades físicas varían según la dirección..

Higroscopicidad: Designa las variaciones dimensionales de la madera sea cual sea el sentido e incluye, por tanto: la contracción (disminución de las dimensiones) y el hinchazón (aumento de las dimensiones). La higroscopicidad es una de las consecuencias de las variaciones de la humedad de la madera por debajo del Punto de saturación de fibras. Distinguimos entre la contracción lineal (axial, radial o tangencial) y la contracción volumétrica. La contracción tangencial es más o menos el doble de la contracción radial, mientras que la contracción axial o longitudinal se considera insignificante.

Humedad:

1. Contenido de agua del suelo, de la atmósfera.
2. Característica de aquello que está húmedo, ligeramente mojado o infiltrado con agua, de un líquido.
3. Característica de un clima, de una región o la atmósfera está cargada de agua.

I **Índice de humedad en anhidro H (%):** Representa la relación entre la masa de agua contenida en una muestra en relación con su masa anhidra (masa de la materia que compone la madera sin agua de impregnación ni libre). Atención, la masa de agua puede ser superior a la masa de la madera (H= 200%).

$$H (\%) = H (\%) = \frac{M_{eau}}{M_{anhidre}} \times 100 = \frac{M_{humide} - M_{anhidre}}{M_{anhidre}} \times 100$$

L **Líber (Corteza interna):** Tejido vegetal secundario producido por el cámbium, los tallos y las raíces. Conduce la savia elaborada.

M **Masa anhidra:** Se da cuando la madera ya no contiene agua libre ni de impregnación. El índice de humedad en anhidro vale H = 0%.

P **Punto de rocío o (temperatura de rocío):** temperatura más baja a la que una masa de aire puede ser sometida a una presión y humedad dadas sin que se produzca una formación de agua líquida por saturación.

Punto de saturación de fibras (PSF): En casi la totalidad de las especies corresponde a una humedad cercana al 30%. Este punto se alcanza cuando toda el agua libre ha salido de la materia y queda toda el agua de impregnación. Por encima del Punto de saturación de fibras, el secado tiene lugar sin variaciones dimensionales de la madera; mientras que por debajo, en el aspecto higroscópico, el secado produce una merma de la madera debido a la evacuación del agua de impregnación.

R **Regulación todo o nada:** En una regulación todo o nada, mientras que no se alcance la consigna, el órgano de climatización funciona a plena potencia hasta que la consigna se alcance. Por ejemplo, mientras que la temperatura requerida no se alcance, la válvula de calefacción estará completamente abierta. Se cerrará cuando se consiga dicha temperatura.

S **Secado:** Tratamiento que tiene por objetivo eliminar, parcial o totalmente, de un cuerpo el agua que contiene.

Secado de la madera: Conjunto de operaciones que consiste

en disminuir el grado de humedad de piezas de madera a través de la eliminación de una parte del agua que contienen. Esta técnica requiere dos principios: aporte de energía y evacuación de la humedad.



IX - Bibliografía

- ABARCO EXPERTISES. (s.f.). Au service de la construction et de l'industrie. Recuperado de Expert-bois: <http://www.expert-bois.fr/materiau-anisotrope-ABARCO-EXPERTISES-expert-bois-construction>
- AFNOR. (14 de abril de 2018). NF B52-001-1. *Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structure des bois sciés résineux et feuillus - Partie 1 : Bois massif*. Ediciones AFNOR.
- ART LEVAGE. (s.f.). ART ELAGAGE 14 - ELAGAGE Calvados: Biologie de l'arbre. Consultado el 17 de marzo de 2018, en http://www.art-elagage.com/biologie_de_l_arbre.php
- Cathild®. (s.f.). Cathild.
- CENTRE TECHNOLOGIE FORESTAL DE CATALUNYA, O. N.-R. (2012). *Guide de sylviculture du pin à crochets dans les Pyrénées - La gestion des peuplements et la valorisation du bois de pins à crochets*. (P. P. UNCI'PLUS, Ed.)
- CRITTBois. (2018). CRITTBois Occitanie. Recuperado de www.critt-bois.com
- DAVESNE, P. C. (1991). *Le séchage des feuillus une nécessité économique*. CTBA.
- Édouard BOUREAU, X. D.-G. (2018). « BOIS ». *Encyclopædia Universalis [en ligne]*. Consultado el 3 de abril de 2018 en <http://www.universalis.fr/encyclopedie/bois/>
- G. Gandon, OLERGIE. (s.f.).
- G. Négrié, FCBA. (s.f.).
- GénieCVL. (s.f.). *Documentation technique dans le domaine de la construction*. Recuperado de GENIECVL: <http://geniecvl.com>
- J.-P. Bazette, C. H. (2013). *Mémotech - Bois et matériaux associés*. (CASTEILLA, Ed.) París: Delagrave.
- Le sourire d'Isis. (s.f.). *Le sourire d'Isis*. Recuperado de <http://www.sophrologie-44-aromatherapie.fr>
- Moutee, M. (2006). Généralités et revue de littérature.
- Tardieu, A. D. (s.f.). Hy. Ls. Duhamel Sgr. du Monceau / Peint par Drouais fils. Gravado de Ambroise Tardieu. Consultado el 17 de abril de 2018 en <http://resource.nlm.nih.gov/101414032>

Muchas gracias a los diferentes interlocutores y empresarios que han aceptado de buena gana reunirse con nosotros y contestar a nuestras preguntas.





X - Índice de ilustraciones

Figura 1: proceso simplificado de secado (crittbois, 2018)	15
Figura 2: sección transversal del árbol (crittbois occitanie)	17
Figura 3: sección transversal del árbol (art levage)	17
Figura 4: las aguas de la madera (géniecvl)	20
Figura 5: reparto de las diferentes formas de agua de la madera (crittbois, 2018)	21
Figura 6: identificación del indicador de referencia: índice de humedad en anhidro e (crittbois, 2018)	21
Figura 7: detalles del método por medida eléctrica (crittbois, 2018)	22
Figura 8: ilustración del gradiente de humedad en una pieza de madera (crittbois, 2018)	24
Figura 9: medida de la humedad con un higrómetro de agujas (crittbois, 2018)	24
Figura 10: madera con índice de humedad en anhidro del 10%	28
Figura 11: madera con índice de humedad en anhidro del 60% (bois vert)	28
Figura 12: índice de equilibrio higroscópico de la madera (%) (mémotech - bois et matériaux associés, 2013)	29
Figura 13: figura sacada de dtu 41.2 «Revestimiento exterior » - humedad	30
Figura 14: izquierda: denominación según la nf b51-002 ¹³ . Derecha: recomendación sobre los índices de humedad a conseguir según el tipo de servicio que la madera va a ofrecer. (Crittbois, 2018)	31
Figura 15: circulación desde las zonas calientes a las frías (crittbois, 2018)	34
Figura 16: circulación de las zonas húmedas a las secas (crittbois, 2018)	34
Figura 17: mecanismo de secado (crittbois, 2018)	34
Figura 18: diferentes tipos de deformación (moutee, 2006)	36
Figura 19: azulado (crittbois, 2018)	37
Figura 20: fendas en los extremos en haya al salir del secadero (crittbois, 2018)	37
Figura 21: colapso (desmoronamiento celular) (abarco expertises)	38
Figura 22: distribución de las pilas de madera para el secado (g. Gandon, olergie)	43
Figura 23: ventajas y desventajas del secado al aire libre (schéma reproduit selon (le séchage des euillus une nécessité économique, 1991, p. 50)	44
Figura 24: secadero con sistema de aire acoindicionado caliente(g. Négrié, fcba)	46
Figura 25: secado por deshumidificación (g. Négrié, fcba)	47
Figura 26: secado al vacío por placas y por vapor supercalentado (g. Négrié, fcba)	48
Figura 27: créditos fotos (crittbois, 2018)	51
Figura 28: papel secante a cambiar antes de cada ciclo (crittbois, 2018)	52
Figura 29: colocación de sondas: ejemplo de posible colocación de sondas (crittbois, 2018)	53
Figura 30: sondas colocadas perpendicularmente al sentido del hilo de la madera debajo de la antepenúltima fila de un paquete. (Crittbois, 2018)	53
Figura 31: colocación de paquetes: buenas y malas prácticas (g. Gandon, olergie)).	54

¹³ NF B 51-002 (02/1942): Madera – Características físicas y mecánicas de la madera.





XI - Índice de tablas

Tabla 1: VENTAJAS E INCOVENIENTES DE LOS DIFERENTES MÉTODOS.....	27
Tabla 2: Valores medios de la contracción total de las especies pirenaicas.....	32
Tabla 3: Coeficientes de higroscopicidad de las especies pirenaicas.....	33
Tabla 4: Síntesis de los factores que influyen en el secado de madera (G. Gandon, OLERGIE).....	35
Tabla 5: Características de los rastreles a utilizar para el secado natural (CRITTBois, 2018).....	41
Tabla 6: Algunos ejemplos de tiempos de secado al aire libre (CSTB).....	43
Tabla 7: Tabla de comparación de diferentes métodos de secado según varios criterios (G. Gandon, OLERGIE).....	49
Tabla 8: Dimensiones de los rastreles en función del grosor de las tablas.....	51
Tabla 9: Tabla en blanco de secado tradicional.....	56
Tabla 10: Ficha de seguimiento de secado (CRITTBois, 2018).....	57
Tabla 11: Características físicas y mecánicas del roble.....	60
Tabla 12: Correspondencia entre las categorías visuales y los tipos de resistencias mecánicas para el roble (AFNOR, 2018).....	60
Tabla 13: Detalles ciclo por ciclo del roble de los Pirineos (CRITTBois, 2018).....	61
Tabla 14: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL HAYA.....	62
Tabla 15: Correspondencia entre las categorías visuales y los tipos de resistencias mecánicas para el HAYA (AFNOR, 2018).....	62
Tabla 16: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL ABETO.....	63
Tabla 17: Correspondencia entre las categorías visuales y los tipos de resistencias mecánicas para el ABETO (AFNOR, 2018).....	64
Tabla 18: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS PARA EL ABETO (CRITTBois, 2018).....	65
Tabla 19: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS PinO Silvestre.....	65
Tabla 20: Correspondencia entre las categorías visuales y los tipos de resistencias mecánicas para el PINO SILVESTRE (AFNOR, 2018).....	66
Tabla 21: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL PinO Radiata.....	67
Tabla 22: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL PINO NEGRO (CENTRE TECHNOLOGIE FORESTAL DE CATALUNYA, 2012).....	68
Tabla 23: Correspondencia entre las categorías visuales y los tipos de resistencias mecánicas para el PINO NEGRO (AFNOR, 2018).....	68





XII - Participantes del proyecto iFORWOOD



**Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie Bois
Occitanie**

17 rue Aristide Briand
12000 RODEZ
FRANCE



Centre de Recherche Forestière de Catalogne – Institut Catalan du Bois

Ctra. De St Llorenç de Morunys Km2
25280 SOLSONA
Espagne



FORESPIR

64 rue Raymond IV
31000 TOULOUSE
FRANCE



**Generalitat
de Catalunya**

Généralitat de Catalunya

Gran Via de Les Corts Catalanes, 612-614
08007 BARCELONA
ESPAGNE



Fundación Hazi Fundazioa

Barrio Muntzaratz, 17ª
48220 Abadiño (Bizkaia)
ESPAGNE



Office National des Forêts

23 bis Boulevard Bonrepos
31000 TOULOUSE
FRANCE



Gestión Ambiental de Navarra, SA

C/ Padre Adoain, 219 bj
31015 PAMPLONA/NAVARRA
ESPAGNE



**Centre de la Propietat
Forestal**

Centre de la Propietat Forestal

Finca Torreferrussa. Crta de Sabadell a Sta Perpètua, km 4,5
08130 ST.PERPÈTUA DE MOGODA
ESPAGNE



Centre National de la propriété forestière

47 rue de Chaillot
75116 PARIS
FRANCE



Union Grand Sud des Communes Forestières

6 rue du Barry
31210 MONTREJEAU
FRANCE



Gobierno de Aragón

Plaza San Pedro Nolasco, 7
50001 ZARAGOZA
ESPAGNE



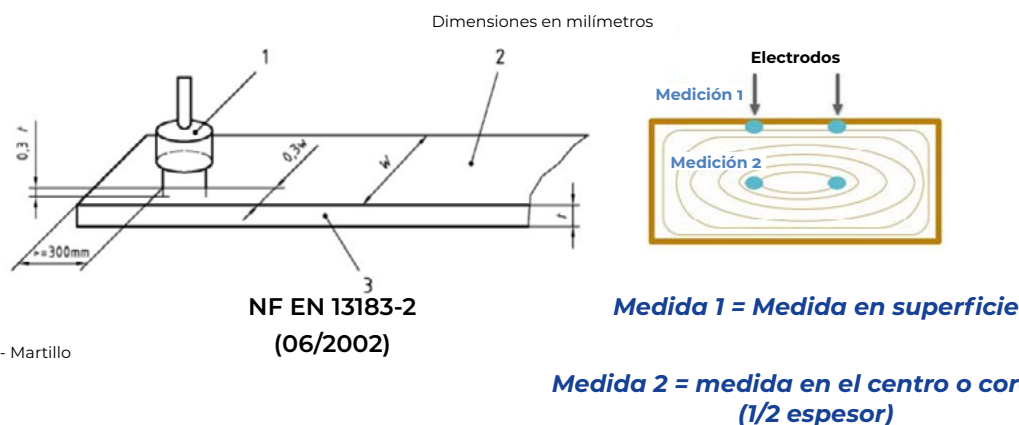


XIII - Anexos

Anexo 1

Medida del índice de humedad de la madera con el método eléctrico por resistencia (NF EN 13183-2)

- Antes de medir, hay que calibrar el aparato de medición para que tome en consideración la temperatura de la madera y la especie que se va a medir.
- Hay que asegurarse de tener los electrodos aislados y comprobar con las instrucciones el método de medida recomendado: medida en el sentido de la fibra (véase a continuación) o perpendicular a la fibra de la madera.



Leyenda

- 1 Electrodo - Martillo
- 2 Cara
- 3 Canto
- t Grosor
- W Ancho

La norma NF EN 13183-2 indica que en una pieza de un lote o en una partida de madera, hay que clavar los electrodos aislados al menos a 30 cm de las testas (o a mitad de la longitud, si esta es inferior a los 60 cm), a 1/3 del ancho y de tal forma que los electrodos penetren a una profundidad de un 1/3 del grosor.

Aconsejamos realizar una medida en la superficie y otra en el corazón a mitad del espesor y así obtener 2 medidas por pieza.

Después de 2 o 3 segundos, lea el resultado y redondear el valor al número entero en % más cercano. La muestra no debe contener madera con resina u otras singularidades como corteza, nudos o bolsas de resina. Si se da esta circunstancia, hay que tomar la medida en otro punto pero siempre que esté cerca de él y hacia el centro de la pieza.

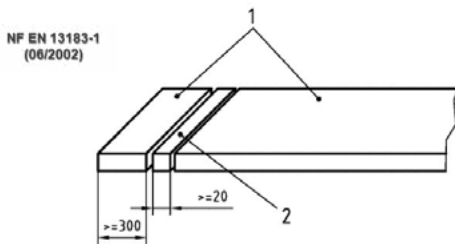
Finalmente, la tabla que aparece a continuación contiene la frecuencia del muestreo y del control según la norma y nuestros consejos.

Número de piezas analizadas	Número de medidas por pieza analizada	Número de piezas en las que se ha realizado la doble medición (superficie y corazón)
1 à 2	3	6
3 à 5	2	4
> 5	1	2

Es necesario notificar los resultados indicando las especificaciones del lote de madera, la fecha, el tipo de instrumento utilizado, el nombre de la especie, la temperatura, la profundidad...

Anexo 2

Medida del índice de humedad de la madera por pesadas (NF EN 13183-1)



Leyenda

- 1 Pieza sometida a ensayo
- 2 Muestra de ensayo

Pieza 2 = Muestra húmeda a un H(%) desconocido.

Pesada 1

Obtenemos la Masa Húmeda M_h

Secado

Pesada final

Obtenemos la Masa anhidra M_0

Se extrae una sección completa de la pieza de longitud mínima 20 mm en sentido de la fibra. Esta se tomará a 300 mm de distancia de uno de los extremos de la pieza, o a mitad de la pieza si tiene una longitud inferior a 600 mm. La muestra no debe contener madera con resina u otras particularidades como corteza, nudos o bolsas de resina. Si se dan estas singularidades, hay que hacer la medida en el punto más próximo posible hacia el centro de la pieza.

Pesar la muestra con:

- Una balanza con un grado de precisión de 0,1 g, si una vez estimada la masa de la muestra en estado anhidro, esta debiera pesar más de 100 g.
- Una balanza con un grado de precisión de 0,01 g, si una vez estimada la masa de la muestra en estado anhidro, esta debiera pesar menos de 100 g.

En un horno que permita:

- Secar la madera a una temperatura constante de $103 \pm 2^\circ\text{C}$.
- Asegurar la libre circulación interna de aire.

Objetivo: Secar la muestra hasta que la diferencia de masa entre dos pesadas consecutivas hechas en un intervalo de 2 h sea inferior al 0,1%. La primera fase de secado debe durar 24 h.

Aplicación de la fórmula:

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

Anexo 3



Ficha de control
Descarga

V-1

1-Datos generales

Fecha de descarga:		Operario:	
--------------------	--	-----------	--

2-Datos del proveedor

Nombre proveedor:		Especie:	
N.º o referencia del lote:		Humedad inicial:	Seca (%) / Verde (%)

3-Control índice de humedad sobre anhidro (solo madera seca)

N.º o referencia palé 1 :		Medida 1 (Super.):		Conformidad?	SÍ / NO
		Medida 2 (Coraz.):			SÍ / NO

N.º o referencia palé 2 :		Medida 3 (Super.):		Conformidad?	SÍ / NO
		Medida 4 (Coraz.):			SÍ / NO

La conformidad se decide acorde al respeto a las especificaciones. Por ejemplo, si una medida supera el 12 % = no conforme

Índice de humedad H1c medio:		Gradiente de humedad G1:		Gradiente G final	
Índice de humedad H2s medio:		Gradiente de humedad G2:			

Rellenar las casillas grises de arriba informáticamente. Reedición de la ficha de control obligatoria

4-Dimensiones de las tablas y las partidas

	Palé n°1 :	Palé n°2 :	Conformidad?
Longitud de la tabla:			
Longitud del palé:			
Grosor 1:			
Grosor 2:			
Grosor 3:			
Grosor 4:			
Grosor 5:			

La conformidad se decide así: anomalía si la tabla más corta es < 3,0 m / El palé más largo es > 3,20 m

El grosor se mide en dos palés realizando un mínimo de 5 medidas en el medio de la tabla

5- Enrastrelado / Flejado / Especificaciones técnicas

Número de rastreles por fila:		Tipo de rastrel:	Madera / Plástico / Metal
Número de soportes por palé:		Forma del rastrel (dibujar):	

Alineado de rastreles:	Bien	Mal	Se puede hacer mejor porque:
Colocación de rastreles en los extremos a 3 cm del borde?			
Sí, colocación correcta	NO		Altura de los palés (soportes incluidos):
 m	Bien	Mal

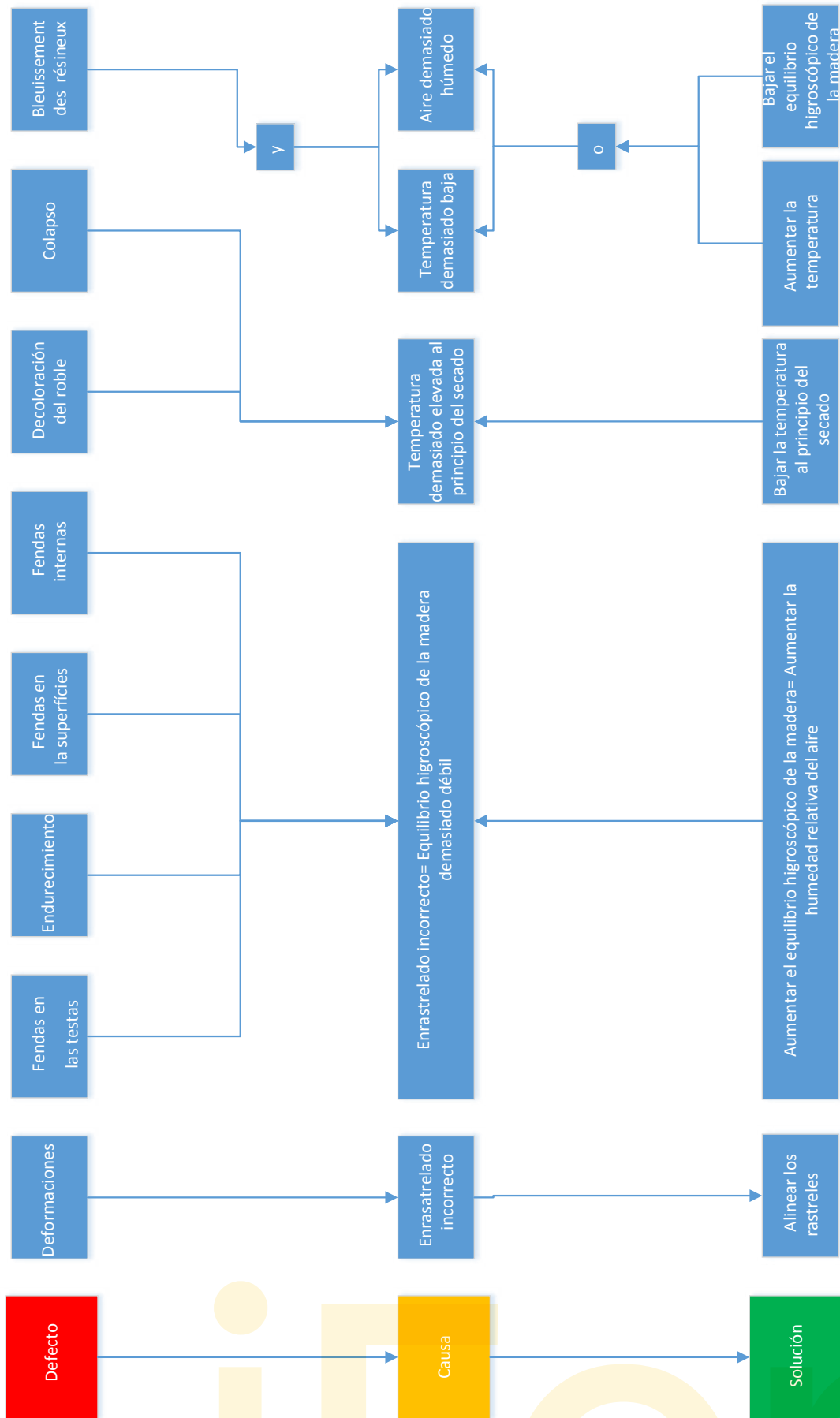
La conformidad se decide así: alineado perfecto = Bien alineado / altura palé conforme a H = 1,20 m (soportes incluidos)

Flejado:	SÍ / NO	En hierro	En plástico	Nº / palé:	
Número de palés no conformes visualmente:					

6- Comentarios:

--

Anexo 4



Interreg POCTEFA iForWood



El proyecto ha sido cofinanciado al 65% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020). El objetivo del POCTEFA es reforzar la integración económica y social de la zona fronteriza España-Francia-Andorra. Su ayuda se concentra en el desarrollo de actividades económicas, sociales y medioambientales transfronterizas a través de estrategias conjuntas a favor del desarrollo territorial sostenible.

