

SECADO DE MADERA

Al cortar el árbol comienza la eliminación del agua en la madera. Primero se evapora la humedad de las partes superficiales y luego el agua de su interior. Durante la remoción del agua, la madera puede sufrir cambios no deseados en su forma y color o ser atacada por hongos e insectos. Si estos defectos no pueden ser controlados, es posible que la madera se convierta en un material no apropiado a los diversos usos a que podría destinarse, ya que la aparición de defectos como grietas, rajaduras y deformaciones, limita considerablemente sus aplicaciones. De igual manera, la utilización industrial de la madera exige que ésta tenga bajos contenidos de humedad, es decir, que es necesario secar la madera si se quiere convertirla en un material apropiado para una gran variedad de aplicaciones industriales. *Por secado se entiende la eliminación del exceso de agua de la madera en forma rápida y económica, minimizando los defectos que se producen.*

Razones para el secado de la madera:

- Lograr estabilidad dimensional de madera en uso.
- Incrementar la resistencia mecánica y mejorar las propiedades como aislante térmico, acústico y eléctrico.
- Reducir su peso y a la vez los gastos de transporte y facilitar la manipulación.
- Incrementar la resistencia biológica, especialmente contra la pudrición y manchas causadas por hongos xilófagos, cromógenos y mohos.
- Permitir el encolado y barnizado de las piezas de madera

La velocidad a la que la madera pierde su humedad está en función de su propia naturaleza y algunos factores externos como la temperatura, el viento y la humedad relativa.

FACTORES QUE AFECTAN LA PÉRDIDA DE HUMEDAD RELACIONADOS CON LA MADERA

- Albura y Duramen

La albura de las coníferas generalmente tiene un contenido de humedad mayor que el duramen mientras el contenido de humedad de la albura de las latifoliadas es algo más alto o igual que el del duramen. La infiltración de gomas, resinas y otros materiales en el duramen lo hacen menos permeable que la albura, por esto el duramen usualmente requiere tiempos de secado más largos. También la baja permeabilidad del duramen lo hace más susceptible a ciertos defectos de secado y requiere condiciones de secado más suaves.

- Anillos de Crecimientos

La madera aserrada radial o tangencialmente responde de manera diferente al secado. Así, la cortada tangencialmente (0-45 °C) es menos susceptible al colapso, se contrae y se dilata menos en espesor y seca más rápido que la de corte radial, mientras que la de corte radial contrae y se dilata menos en ancho y tiene menos torceduras, abarquillado y grietas superficiales que la de corte tangencial.

➤ Radios

Debido a que los radios son débiles y secan más rápido que las células de alrededor, usualmente ocurren grietas en los extremos, en la superficie y cerca de ellos. Especies tales como el cedro, con radios grandes, requieren especial cuidado durante las primeras etapas del secado.

➤ Grano y Textura

La madera de grano recto es más fácil de secar que la madera de grano entrecruzado o en espiral como la caoba que es más difícil de secar sin que ocurran alabeos. La madera de grano grueso o basto seca más rápidamente que la de grano fino, y la madera de grano uniforme desarrolla menos defectos de secado que la madera de grano no uniforme.

➤ Color

Las maderas de color claro generalmente se oscurecen con el secado, especialmente cuando se aplican altas temperaturas. Pero esto se puede volver beneficioso cuando se desea oscurecer la albura para obtener un mejor color y en este caso se usa vaporización antes del secado.

➤ Variaciones en la Estructura

La madera aserrada contiene variaciones en la estructura, tales como grano entrecruzado, nudos, madera de reacción, madera juvenil entre otros.

El grano en espiral, diagonal, entrecruzado contrae más en sentido longitudinal que el grano recto, tales maderas pueden presentar arqueadura, torcedura y encorvadura durante el secado. La madera juvenil y la de reacción también contraen más en sentido longitudinal que la normal y de igual manera pueden suceder arqueadura, torcedura y encorvadura, y cuando es restringida puede fracturar y formar grietas transversales en la madera aserrada.

➤ Densidad y Peso Específico

La densidad es una característica de gran interés en el secado. En general se puede decir que cuanto más densa es la madera más difícil es de secar. Cuanto mayor sea el peso específico mayor será la cantidad de madera seca por unidad de volumen de madera verde. Así, al mismo contenido de humedad, maderas con peso específico alto contienen mayor cantidad de agua y requieren más tiempo de secado que maderas con peso específico bajo. Así, el peso de la madera depende de su peso específico y de su contenido de humedad. El peso verde de 1 m³ de madera puede ser calculado por la fórmula:

$$P_v = \frac{P_e(CH + 100)D_a}{100}$$

Donde: P_e = Peso específico
 CH = Contenido de Humedad
 D_a = Densidad del agua

Por ejemplo, el peso verde de 1 m³ de una especie con peso específico de 0,4 a 75% de contenido de humedad es 700 kg. El peso seco al horno (sustituyendo el contenido de humedad por cero en la fórmula) es 400 Kg. es decir, hay 300 Kg. de agua presente. A un peso específico de 0,6 igualmente a 75 por ciento de contenido de humedad, el peso verde es 1050 Kg. el peso seco al horno 600 kg. Por lo tanto el peso del agua es 450 kg. Así, hay 150 Kg. de agua más a 0,6 de peso específico que a 0,4.

➤ Dimensiones de la Madera

El tiempo de secado varía en forma exponencial con el espesor, por lo que al secar la madera se debe clasificar principalmente por espesor. En cambio el largo y el ancho de una pieza de madera no son determinantes en el comportamiento de la madera durante el secado.

➤ Estado Fitosanitario

Muchas maderas susceptibles al ataque de hongos e insectos sufren daños tan severos, en estado verde que no vale la pena secarlas. La única manera de conservar la calidad de estas maderas es un tratamiento profiláctico de las trozas en el bosque inmediatamente después de ser cortadas, y después de aserradas un baño profiláctico (antimancha más insecticida).

➤ Contenido de Humedad inicial (CHI)

La humedad inicial está en función de la época de corte y la acción del medio ambiente sobre la madera. CHI muy variados dificultan el secado, es recomendable, en lo posible, seleccionar lotes con contenidos de humedad homogéneos.

➤ Contenido de Humedad Final (CHF)

Depende del uso final que se le vaya a dar posteriormente.

FACTORES QUE AFECTAN LA PÉRDIDA DE HUMEDAD RELACIONADOS CON LAS VARIABLES DEL PROCESO

➤ Temperatura.

Recordemos que es necesaria la aplicación de algún tipo de energía calorífica para poder evaporar el agua de la madera, y estos requerimientos van en aumento a medida que progresa el secado, con el fin de liberar el agua de las grandes fuerzas higroscópicas con las cuales es retenida en la madera. La velocidad de evaporación depende a su vez de la gran cantidad de energía suministrada por unidad de tiempo y de la capacidad del medio (aire) para absorber la humedad liberada por la madera.

El suministro de calor en el secador es necesario para; (1) calentar la madera, (2) evaporar la humedad de la madera, (3) calentar el aire frío que entra en el secador y (4) reemplazar la pérdida de calor que absorbe la estructura del secador.

El método usual de calentamiento de la madera se realiza de forma indirecta a través de intercambiadores de calor colocados dentro del secador, éstos transportan los productos de la combustión de la fuente de calor como petróleo, gas, carbón, madera, aserrín o transportan agua caliente, vapor de agua, aceite térmico, etc . Los hornos de calentamiento directo no son apropiados para secar madera aserrada.

La temperatura óptima del secador depende, sobre todo de la especie, espesor, contenido de humedad inicial y del uso final de la madera a secar. Además, es importante tomar en cuenta que la temperatura, conjuntamente con la humedad relativa, son los elementos que determinan el clima dentro del secador y el contenido de humedad de equilibrio de la madera.

Como norma general, las mayores economías durante el secado se obtienen cuando se trabaja con las máximas temperaturas que pueda resistir la madera, puesto que el calor acelera la difusión de la humedad desde el interior de la pieza hacia su superficie. Mientras que bajas temperaturas son aplicadas para secar maderas en las cuales pueden presentarse defectos como decoloración, exudado de resina y nudos sueltos al aplican altas temperaturas.

➤ Humedad Relativa (HR)

La humedad del aire es un factor importante para el control del contenido de humedad de la madera, particularmente en aquellos casos donde es necesario controlar la evaporación en la superficie de la misma. Así, la humedad relativa afecta el **gradiente de humedad** y la contracción de la madera, por lo tanto tiene una relación directa con los esfuerzos al interior de la pieza que pueden conducir a la aparición de defectos como torceduras y rajaduras.

La humedad relativa dentro de la cámara de secado generalmente se controla mediante un sensor y controlador del bulbo húmedo, en los secadores computarizados se controla el contenido de humedad de equilibrio (CHE) de la cámara mediante un sensor que envía la señal al programa principal. En caso de que el CHE sea menor que el programado para esta etapa de secado, se agrega vapor a la cámara a través de los rociadores o humidificadores, en caso contrario, que el CHE sea mayor que el programado se abren las ventilas colocadas en la parte superior del horno para permitir el escape de aire húmedo y la entrada de aire fresco.

La humedad relativa del aire afecta directamente la humedad de la madera, es decir si la HR del aire aumenta también aumenta la humedad de la madera y viceversa. Esta aseveración se cumple cuando se mantiene la temperatura y cuando los procesos se llevan a cabo en un sistema cerrado, como en el caso de un secador para madera.

La humedad relativa del aire y en consecuencia la humedad de la madera está fuertemente influenciada por la temperatura. El aire caliente necesita una cantidad mayor de agua para saturarse que el frío y por lo tanto puede absorber mayor cantidad de agua de la madera.

Las etapas de secado donde se necesita mayor cantidad de vapor dentro de la cámara para aumentar el CHE son al principio de secado y al final para las etapas de

ecualización y acondicionamiento o compensación cuando el uso final de la madera así lo amerite.

➤ Velocidad del aire.

El aire dentro de la cámara puede circular por gravedad (ventilación natural) o por medio de ventiladores que producen una ventilación forzada, con el objeto de aumentar la velocidad del aire y con ello acelerar el secado de la madera.

La velocidad del aire dentro de la pila de madera tiene como funciones principales: **transmitir la energía** requerida para calentar el agua contenida en la madera facilitando así su evaporación y **transportar la humedad** saliente de la madera.

La capa límite que existe entre la madera y el aire juega papel importante en el secado de la madera. Cuanto menor sea el espesor de esta capa, más rápida será la remoción de la humedad de la superficie de la madera.

Al igual, la velocidad del aire desempeña papel importante en las primeras etapas del secado, sobre todo cuando la madera está muy húmeda ($CH > 30\%$). A mayor velocidad de aire mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa. Es importante destacar que una buena ventilación es sinónimo de un buen secado, ya que juega un papel muy importante al principio del ciclo sobre la velocidad del secado y al final sobre la homogeneidad en el contenido de humedad de las piezas de madera en la pila.

Experimentalmente se ha demostrado que se obtienen condiciones óptimas de secado, en la mayor parte de los casos, cuando el aire circula en la pila a una velocidad de 2 m/s. si se utilizan velocidades mayores sin un debido control puede comprometerse la calidad de la madera por cuanto se acelera considerablemente la tasa de evaporación del agua, generándose un gradiente de humedad muy alto entre la superficie de la madera y su parte interna.

En conclusión, desde el punto de vista económico es importante tener presente los elementos de control del secado de la madera (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire), que una modificación de las condiciones de circulación de aire en el secador implica mayores costos que cuando se opta por regular las condiciones de temperatura y humedad relativa. Para modificar la HR en un secador a vapor, sólo se requiere aumentar o disminuir la cantidad de vapor rociado y/o aumentar la acción de las ventilas, por lo cual puede considerarse el método más económico. Para el caso de la temperatura, un aumento en la capacidad máxima de calentamiento puede exigir mayor capacidad del hogar de la caldera o una caldera adicional, cuyo costo sería en ambos casos mayor que cuando se alteran las condiciones de HR, pero menor que cuando se modifica la velocidad del aire, ya que la energía eléctrica consumida por los ventiladores es aproximadamente proporcional al cubo de la velocidad del aire.

LA HUMEDAD EN LA MADERA

Cuando el árbol está recién cortado, su madera contiene gran cantidad de agua, variando el contenido según la época del año, la región de procedencia y la especie

forestal. El agua contenida en la madera se encuentra bajo diferentes formas (agua libre, agua de saturación o higroscópica y agua de constitución).

El **agua libre** se encuentra ocupando las cavidades celulares o lumen de los elementos vasculares, dándole a la madera la condición de verde. La cantidad de agua libre que puede contener una madera está limitada por su volumen de poros.

Al iniciarse el secado, el agua libre se va perdiendo fácilmente por evaporación, ya que es retenida por fuerzas capilares muy débiles, hasta el momento que ya no contiene más agua de ese tipo. En este punto la madera está en lo que se denomina "Punto de Saturación de las fibras" (PSF). Cuando la madera ha alcanzado esta condición, sus paredes están completamente saturadas pero sus cavidades están vacías.

Durante esta fase de secado, la madera no experimenta cambios dimensionales, ni alteraciones en sus propiedades mecánicas. Por tal razón, el PSF es muy importante desde el punto de vista físico-mecánico y de algunas propiedades eléctricas de la madera.

El **agua de saturación o higroscópica** es la que se encuentra en las paredes celulares, es evaporada por difusión, y la pérdida de humedad ocurre con más lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera circundante.

Para la mayoría de las especies el equilibrio higroscópico está entre el 12 y 18% de contenido de humedad, dependiendo del lugar donde se realiza el secado. La madera secada al aire libre sólo puede alcanzar estos valores de contenido de humedad de equilibrio. Para obtener contenidos de humedad menores, debe acudir al secado artificial para eliminar el resto de agua higroscópica.

El **agua de constitución** forma parte de la materia celular de la madera y que puede ser eliminada utilizando las técnicas normales de secado. Su separación implica la destrucción parcial de la madera.

Determinación del Contenido de Humedad de la Madera

La determinación del contenido de humedad en la madera se hace considerando sólo los valores de agua libre y de saturación. Es decir, que en la práctica, la madera se considera totalmente seca cuando al secarla en estufa a 103 ± 2 °C alcanza peso constante.

El **contenido de humedad** se define como el peso de la cantidad de agua presente en una pieza de madera, expresado en función del peso de esa pieza en condición seca al horno o anhidra. Su valor se expresa en porcentaje y se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$CH = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

Donde:

CH = Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro

Ph = Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial

Ps = Peso de la madera en estado anhidro; peso final o constante

Para determinar el contenido de humedad en la madera existen numerosos procedimientos, siendo los más aceptados el método de secado en estufa y los métodos eléctricos que utilizan detectores de humedad.

El *método de secado en estufa* es el más exacto y el único científicamente satisfactorio para determinar el agua contenida en la madera.

El éxito en la aplicación de este método depende de la correcta selección de muestras o probetas de desecación, las cuales deben ser representativas del lote de madera objeto de evaluación. El procedimiento es el siguiente.

Obtención de las probetas o muestras de control: de la pieza o tabla se corta un listón transversal de 15 a 20 cm. de espesor en la dirección del grano y a unos 50 cm del extremo de la pieza. Las muestras deben estar sanas y libres de defectos.

Determinación del peso húmedo o peso inicial: inmediatamente después de cortadas, las probetas deben pesarse en balanzas con una precisión de 0,1g para aquellas que pesan 100 gr o más y de mayor sensibilidad para probetas más pequeñas.

Secado de las probetas hasta peso constante: luego se introducen las probetas en la estufa para proceder con el secado. Se recomienda el uso de estufas con termostato regulable para mantener la temperatura a 103 ± 2 °C y con buena circulación de aire.

Determinación del peso seco (peso constante): para determinar el momento en que las probetas alcanzan peso constante, se hacen pesadas intermedias con el fin de observar la disminución del peso. Después del secamiento, las probetas deben sacarse lo más rápidamente posible para evitar que absorban humedad del aire. De igual manera, para eliminar cualquier variación deben enfriarse en un ambiente absolutamente seco, que puede ser un desecador con cloruro de calcio o pentóxido de fósforo.

Cálculo de contenido de humedad. Ejemplo: calcule el contenido de humedad promedio de dos probetas o secciones de humedad cuando:

Peso verde de la sección	a	98,55 g
Peso seco de la sección	a	59,20 g
Peso verde de la sección	b	86,92 g
Peso seco de la sección	b	55,02 g

Contenido de humedad de la sección a	Contenido de humedad de la sección b
$CH_a = \frac{98,55 - 59,20}{59,20} * 100 = 66,47\%$	$CH_b = \frac{86,92 - 55,02}{55,02} * 100 = 57,98\%$

El contenido de humedad promedio de las secciones a y b es

$$CH = \frac{66,47 + 57,98}{2} = 62,22\%$$

La medición del contenido de humedad de la madera por **métodos eléctricos** tiene su base en las diferentes propiedades eléctricas de la madera seca y de la madera húmeda, tanto en relación a la conductividad eléctrica, como a la constante dieléctrica y a la pérdida de potencia.

Específicamente la resistencia eléctrica y las propiedades dieléctricas de la madera dependen, en una forma bien definida, de su contenido de humedad, sobre todo en el rango de 6 a 25% de contenido de humedad.

Los aparatos eléctricos que emplean la relación entre humedad y resistencia son los llamados “**tipo resistencia**”; aquellos que emplean la relación entre el contenido de humedad y constante dieléctrica se conocen con el nombre “**tipo de capacidad**” y los aparatos que se basan en la relación entre el contenido de humedad y pérdida de fuerzas de radiofrecuencia se conocen con el nombre de “**tipo radio frecuencia**”.

Los del tipo resistencia se fabrican con electrodos cortos o largos, del tipo de aguja, aislados en toda su longitud menos en las puntas. Los medidores tipo radiofrecuencia por pérdida de potencia son fabricados con electrodos de contacto que se aplican a la superficie de madera sin perforarla; se utilizan para chapa o madera muy delgada.

MUESTRAS PARA EL CONTROL DEL SECADO

1. Control Manual

A medida que la madera se va secando, desarrolla esfuerzos que siguen un patrón asociado con los cambios de humedad. Como no es posible medir la humedad de toda la madera durante el proceso, es necesario acudir a muestras representativas de la carga. Estas muestras se colocan dentro de la pila, de forma que se pueda determinar su contenido de humedad periódicamente.

Si bien es necesario dañar algunas piezas de madera para obtener las muestras y se requiere tiempo y trabajo para efectuar el control, estos inconvenientes son recompensados por las ventajas que ofrece poder controlar la humedad durante el proceso. Entre ésta, es importante mencionar:

- Indican la velocidad del secado
- Permiten detectar fallas que afectan la eficiencia de las cámaras
- Sirven para ajustar el programa de secado y los cambios climáticos
- Indican la necesidad de tratamientos de recuperación o acondicionamiento y la duración de ellos
- Ayudan a reducir los tiempos de secado y a mejorar la calidad
- Permiten controlar el contenido de humedad final
- Ayudan a determinar los horarios de secado

Estas ventajas se resumen en economía, madera libre de esfuerzos y humedad final más uniforme.

1.1 Determinación del Contenido de Humedad y del Peso Seco al Horno de las Muestras

El contenido de humedad de la muestra de secado se obtiene del promedio de las dos probetas cortadas de cada uno de los dos extremos, utilizando el sistema de secado en estufa. Para tal efecto, después de cortadas, las probetas se limpian, marcan y pesan; luego se colocan dentro de una estufa con temperatura de 103 ± 2 °C hasta obtener peso constante; se determina su contenido de humedad según la fórmula.

Inmediatamente después de cortada, la muestra de secado se limpia, se codifica, se sella en sus dos extremos con un producto impermeabilizante y resistente a la temperatura y se pesa. Dicho peso corresponde al peso inicial o verde de esa muestra.

El peso final o peso seco al horno (PSH) de la muestra se calcula en función de su peso inicial y su respectivo contenido de humedad (CH promedio de las probetas) utilizando la fórmula de CH convenientemente despejada:

$$\text{PSH} = \frac{Ph}{CH + 100} * 100 \quad \text{donde Ph es el peso inicial de la muestra testigo}$$

Ejemplo: calcular el peso seco al horno de la muestra testigo, siendo su peso inicial de 5,12 kg, utilizando el contenido de humedad promedio calculado de las secciones de humedad 1 y 2.

$$\text{PSH de la muestra} = \frac{5,12kg}{62,22 + 100} * 100 = 3,156kg$$

1.2 Colocación de las Muestras de Secado en las Pilas.

Una vez que las muestras testigos han sido cortadas, revestidos sus extremos y pesadas, se colocan en las cargas o paquetes de madera aserrada durante las operaciones de apilado. Dado que las muestras testigos representan al lote que se está secando, deben estar expuestas a las mismas condiciones de secado, ya que de otra manera darán una indicación falsa del porcentaje de contenido de humedad de la carga.

1.3 El Uso de las Muestras Testigo Durante el Secado

Cuando el secado avanza, las condiciones climáticas de la cámara varían tomando como base el porcentaje de humedad de las muestras, en diferentes momentos del proceso. La frecuencia con que las muestras se pesen depende de la velocidad de pérdida de humedad: cuanto más rápida sea la pérdida, más frecuente serán las pesadas. Pero inmediatamente se realiza la pesada, las muestras deben ser colocadas nuevamente en la carga. Las muestras también se utilizan para hacer pruebas intermedias de humedad y controles de tensión mediante pruebas de tenedor.

Para determinar el CH actual de una muestra, se requieren dos pesos: el peso actual y el peso seco al horno calculado. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\text{CH actual} = \frac{Ph - PSH}{PSH} * 100 \quad \text{donde Ph es el peso actual de la muestra y}$$

$$\text{PSH es el PSH calculado de la muestra.}$$

Así, si el peso seco al horno calculado de la muestra es 3,156 kg y su peso actual es 4,52 kg. El porcentaje de humedad actual será:

$$\text{CH actual} = \frac{4,52 - 3,156}{3,156} * 100 = 43,22\%$$

Después de otro día de secado esta muestra puede pesar 4,20 kg. El CH actual de la muestra entonces sería

$$\text{CH actual} = \frac{4,20 - 3,156}{3,156} * 100 = 33,08\%$$

Cuando el contenido de humedad actual se utiliza para controlar la aplicación de un programa de secado, cada cambio de etapa se hace cuando el contenido de humedad promedio de las muestras es igual al contenido de humedad fijado por el programa.

A través del uso de estas muestras se puede calcular el peso que tendrá la misma cuando tenga cierto contenido de humedad. Empleando la fórmula:

$$Pa = \frac{Psh(CH + 100)}{100}$$

Ejemplo: calcular el peso de la muestra anterior cuando alcance un CH de 10%.

$$Pa = \frac{3,156kg(10 + 100)}{100} = 3,472kg$$

Sucede con frecuencia que algunas muestras no siguen el ritmo de pérdida de humedad del resto. Si se descarta el mal funcionamiento de la cámara, se puede suponer entonces que el cálculo inicial del peso seco fue erróneo. En tales casos, conviene proceder a recalcularlo de la forma siguiente: recortar una porción de 10 a 15 cm en uno de los extremos, sacar una probeta de unos 25 mm y sellar el extremo resultante para luego pesar la muestra sobrante; con la probeta de humedad obtenida volver a obtener el CH y con éste recalcularlo el nuevo peso seco de la muestra que servirá para el control del secado. Esta prueba se aconseja realizarla cuando se haya alcanzado un 20% de CH o cuando se estime que se ha llegado a la humedad final, antes del acondicionamiento.

Para algunas maderas propensas al colapso y endurecimiento es conveniente hacer un chequeo de tensiones cuando su contenido de humedad ha llegado al punto de saturación de las fibras. En tal caso, se procede de la siguiente forma: a una distancia de 10 a 15 cm de uno de los extremos de la muestra se cortan dos probetas de 25 a

30 cm de ancho; una de las probetas se utiliza para determinar el contenido de humedad y la otra para efectuar la prueba de tenedor. La muestra testigo recortada debe pesarse para calcular su nuevo peso seco al horno.

1.4 Contenido de Humedad Final, Prueba de Esfuerzos y Gradiente de humedad

Cuando se ha llegado a la humedad final, se han aliviado tensiones mediante acondicionamiento y la carga se ha sacado de la cámara, se utilizan las muestras de control de humedad para confrontar la humedad final y determinar la efectividad del acondicionamiento. Para ello, de la parte central de la muestra se cortan 3 probetas, cada una de 25 a 30 mm de ancho, una se destina a determinar, por el método de secado en estufa, el CH final; la otra a la prueba de tenedor para reconocer el estado de tensiones de secado; y la tercera para establecer el gradiente de humedad.

El procedimiento utilizado para conocer la distribución de humedad al interior de la pieza de madera es el siguiente: después de cortadas, se pesan separadamente las partes externas, intermedias e internas obtenidas de la probeta. Luego se llevan a la estufa hasta alcanzar su peso seco al horno. Con los datos del peso inicial y el peso seco al horno se calculan los contenidos de humedad correspondientes a las tres diferentes partes de la sección transversal de la pieza. Cuando el secado ha sido normal, incluyendo el periodo de acondicionamiento, la diferencia de humedad entre las partes externas y central no deben ser significativas (no mayores que 20%). En caso contrario, se presentarán deformaciones cuando la madera sea cortada.

La prueba de tenedor, se realiza para detectar las tensiones de secado, si el espesor de la madera es menor que 4cm se hacen dos cortes paralelos a la superficie correspondiente al ancho de la tabla, para obtener de este modo tres dientes y dejar dos después de eliminar el diente central. Si la madera en secamiento es mayor de 4cm se hacen cinco cortes, para obtener seis dientes y dejar cuatro después de eliminar el segundo y el quinto.

La dirección en la cual los dientes se orientan nos dirán como es el comportamiento de la madera. (1) Si las puntas exteriores se curvan hacia dentro considerablemente, la madera está sometida a tensiones. (2) Si las puntas exteriores están derechas, la madera está libre de tensiones, y (3) las puntas exteriores se han doblado hacia fuera considerablemente, la madera está sometida a una inversión de tensiones.

Cuando obtenemos el resultado (1), el acondicionamiento debe ser prolongado por algún tiempo. El resultado (3) nos indica que las cargas subsiguientes deben ser acondicionadas con una ligera mayor depresión del bulbo húmedo, o por un periodo de tiempo más corto.

2. Control con Electrodo o Sensores

Mediante dispositivos electrónicos (electrodos) se puede determinar instantáneamente el contenido de humedad de la muestra testigo. La lectura del CH se hace directamente de un equipo de control instalado en el cuarto de control, al cual se conectan los electrodos por cables. La selección y colocación de las muestras testigos en la pila, son las mismas que aquellas descritas para el control manual.

MÉTODOS DE SECADO

Para reducir el contenido de humedad de la madera se tienen dos tipos de métodos comúnmente usados en la industria. Secado al aire o secado natural y secado artificial.

1. Secado Natural

Este tipo de secado se consigue exponiendo la madera al medio ambiente. El éxito de esta práctica depende de la forma en que se apile la madera, la cual debe permitir la libre circulación del aire alrededor de cada pieza que se seca. La evaporación del agua y su difusión en forma de vapor va a depender de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire. Estos factores son los que influyen sobre la intensidad y velocidad de secado.

La madera recién aserrada no debe exponerse directamente al sol, por ser propensa al agrietamiento. Para evitar el ataque de insectos y hongos durante este periodo, se sumerge la madera recién aserrada en soluciones preservadoras.

La migración radial es de 20 a 25% menor a la longitudinal; es por eso que si la salida de agua es muy rápida, se rajan los extremos. Es una buena práctica proteger los extremos pintándolos con pinturas de aluminio o al óleo para evitar la pérdida acelerada de la humedad.

El secado natural generalmente se realiza en patios de secado ubicados en un terreno plano, alto, con buen drenaje y sin obstáculos que impidan la libre circulación de aire. El sitio debe mantenerse limpio, cortando el crecimiento de vegetación, así como la acumulación de desperdicios que puedan afectar el aspecto fitosanitario de la madera.

El secado natural o al aire, es la forma más sencilla y a veces más económica para secar la madera, sobre todo si se dispone de buenos patios de secado y condiciones climáticas adecuadas.

El apilado de la madera puede hacerse de varias formas, pero lo más común, para la madera aserrada, es el apilado horizontal.

El **apilado horizontal** de la madera debe hacerse siempre sobre bases o cimientos elevados para evitar que las piezas se apoyen directamente sobre el suelo. Los cimientos pueden hacerse de concreto, madera preservada u otro material. Sobre los travesaños se colocan las piezas que deben ser preferentemente de la misma especie y de igual espesor, espaciadas unas de otras, mediante separadores de madera adecuadamente escuadrados. Estos deben estar perfectamente alineados uno debajo del otro para evitar defectos en el secado de las piezas. El techo debe sobresalir convenientemente en la parte anterior y posterior de la pila. La orientación de la pila depende de la dirección del sol, facilidad de apilado y orientación del sistema de drenaje.

La circulación del aire se realiza de arriba hacia abajo. El aire seco penetra en los espacios entre las piezas y se va saturando con la humedad de ellas, pierde temperatura y va descendiendo, arrastrando a su paso el aire que penetra por los costados de la pila, hasta llegar al fondo, de donde el aire húmedo debe ser desalojado.

Especies con un contenido de humedad inicial muy alto y/o que son muy susceptibles al ataque de hongos e insectos pueden secarse en forma rápida mediante un sistema de apilado en caballete o vertical, terminando luego el proceso con un apilado normal horizontal.

En el **apilado en caballete** las piezas se inclinan o cargan de canto, en forma más o menos vertical, sobre una viga transversal, colocada de 1 a 3 m del piso, debiéndose observar que una pieza se coloque a un lado de la citada viga y la siguiente al lado opuesto, para formar la pila así en x, es decir, con los extremos de las piezas cruzadas.

En el **apilado por los extremos** es como si se inclinara una pila horizontal hasta que las piezas queden casi en posición vertical.

Antes de transportar la madera al patio de secado, es conveniente efectuar una selección en cuanto a especie, dimensiones y calidad, formando pequeños lotes, más o menos homogéneos, que se transportarán con mayor facilidad y darán un secado más uniforme.

2. Secado Artificial

El secado artificial es el proceso por el cual se elimina el agua de la madera mediante el empleo de temperatura, humedad y ventilación, diferentes a las naturales, obtenidas por medio de aparatos e instalaciones especiales, siendo los hornos de secado los más comunes. El secado al horno reduce considerablemente el tiempo de secado y la madera secada artificialmente puede adquirir valores muy bajos de contenido de humedad. Bajo la condición de que el proceso se realice correctamente, la madera obtenida es de mejor calidad que la secada al aire, debido que la madera se seca en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa.

Los hornos, en general, constan de una o varias cámaras en las que la temperatura y la humedad relativa pueden mantenerse a un nivel deseado. Un horno bien controlado secará la madera a un contenido de humedad previsto, en el menor tiempo posible y con la menor producción de defectos en la madera.

Dentro del secado artificial en horno se tiene:

- Secado artificial convencional
 - Secado a bajas temperaturas o presecado
 - Secado a temperaturas normales
 - Secado a altas temperatura
 - Secado con vapor sobresaturado

- Secado por condensación-deshumificación
- Procesos especiales de secado

Procedimiento de Secado en Horno

Una vez introducida la carga de madera dentro del horno, se controla cuidadosamente la temperatura y humedad de la cámara, éstas pueden variar a voluntad del operador, de acuerdo con la clase de madera.

Los cambios de temperatura y humedad relativa que el operador deberá realizar durante el tiempo de secado, constituyen lo que se denomina “programa de secado”.

El programa de secado es suave cuando los cambios de temperatura y humedad se realizan en periodos más o menos largos de tiempo; en caso contrario, el programa de secado será severo, existiendo el caso intermedio o programa moderado.

Prácticamente cada especie tiene un programa propio de secado. Con suficiente experiencia se puede formular un programa para una especie determinada o grupos de especies de similar comportamiento, basándose en el tiempo de secado; sin embargo, este programa variará también con el espesor de las piezas y con el contenido de humedad de la madera al iniciarse el secado.

El contenido de humedad de una pieza que se está secando, representa un índice de las tensiones que se desarrollan dentro de ella. En las primeras etapas del secado se debe usar humedad relativa alta, para controlar los esfuerzos de tracción sobre la superficie de la pieza.

Al final del secado, la humedad relativa baja compensa estos esfuerzos de la madera y ésta no sufre deformación. En las etapas intermedias del secado, la superficie de la pieza estará en compresión, pudiendo resistir humedades relativas algo bajas, sin peligro de rajarse su superficie.

Secado a Bajas Temperaturas o Presecado (< 45 °C)

El presecado es una modificación del secado al aire que puede tener diversas modalidades, pero que básicamente consiste en proteger la madera apilada de la acción directa de la lluvia mediante la construcción de galpones en los cuales pueden instalarse sistemas sencillos para aumentar la velocidad e incluso el calentamiento del aire. En esta forma, es posible reducir el tiempo de secado a una fracción de aquel que se requiere para secar la madera mediante el secado al aire.

El secado a bajas temperaturas casi siempre tiene como finalidad reducir el contenido de humedad de la madera desde el estado verde hasta un 20 a 30%, para evacuar de este modo toda el agua libre y como máximo una tercera parte del agua higroscópica.

Este sistema es ventajoso respecto al secado al aire, pues además de llevar la madera a humedades semejantes pero en menor tiempo, permite obtener un producto de mejor calidad ya que el material siempre está protegido del sol y la lluvia.

Secado a Temperaturas Normales (45 a 90 °C)

Es el secado convencional propiamente dicho y se lleva a cabo dentro de cuartos llamadas cámaras u hornos, en los cuales se puede controlar la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire.

Para calentar estas cámaras se utilizan diversas fuentes térmicas, siendo las más comunes el vapor de agua, el agua caliente y los quemadores o calentadores a base de combustibles derivados del petróleo y la energía eléctrica. La capacidad de calefacción depende de la densidad de la madera, el contenido de humedad, el comportamiento durante el secado y el tipo de cámara.

El secado se realiza siguiendo un programa previamente establecido. El control de las condiciones climáticas se efectúa mediante termómetros de bulbo húmedo y seco (psicrómetro) o termómetros y sensores de equilibrio del contenido de humedad que permiten, por una parte, conocer la temperatura y humedad relativa del aire dentro de la cámara y, por otra, mantener mediante controles automáticos las condiciones ambientales deseadas.

Secados a Altas Temperaturas (> 100 °C)

Surge debido a las necesidades de las industrias de incrementar su producción a un costo razonable y muy competitivo. Si la temperatura se eleva, el flujo de vapor del agua desde el interior hacia la superficie de la madera es más rápido; además se mejora su plasticidad y puede soportar por lo tanto tensiones internas de mayor intensidad sin que se produzcan daños estructurales a medida que se desarrolla el secado.

Por regla general, la velocidad del aire es el doble de la requerida en el secado convencional. La razón para esto es la alta velocidad de difusión de la madera. El aire debe tener una distribución uniforme y pasar equitativamente a través de toda la madera.

Como la duración de este proceso de secado es apenas la mitad o la tercera parte de aquella del secado convencional, los requerimientos técnicos son mayores porque se evacua mayor cantidad de agua por unidad de tiempo, con una eficiencia térmica total que también es mayor.

El secado a altas temperaturas es mucho más apropiado para coníferas. Muchas latifoliadas no la soportan y a otras no conviene secarlas con este sistema.

Secado por Condensación-Deshumificación

El principio de operación en el cual está basado el deshumificador consiste en una máquina de refrigeración que forma parte esencial de la unidad de secamiento.

Esta máquina de refrigeración trabaja como sistema de calentamiento del aire (compresor), como deshumificador (unidad de secamiento por condensación) y como secador con intercambio parcial de aire (como un secador convencional).

La madera colocada en una cámara hermética y aislada térmicamente, es secada por medio de un flujo continuo de aire seco que circula a través de las pilas con una temperatura que varía progresivamente entre aquella de la cámara y 45 °C. El aire seco pasa uniformemente a través de las pilas, absorbe la humedad que se evapora de la madera. La humedad transportada por el aire es succionada por la máquina de refrigeración que la condensa. Luego el agua es evacuada al exterior de la cámara por medio de una tubería de drenaje.

La circulación de aire a través de las pilas es realizada por un sistema de ventilación forzada (ventiladores) que forma parte de la cámara de secado.

Como ventajas de este sistema pueden enunciarse las siguientes:

- Además de utilizar eficazmente el calor, tiene menos restricciones en cuanto a los materiales y a la construcción misma de la cámara de secado.
- La inversión inicial y los costos de mantenimiento son comparativamente más bajos, especialmente para cámaras con capacidad entre 45 y 70 m³.
- Es posible secar al mismo tiempo especies distintas con características de secado similares.
- Es un sistema económicamente eficaz para el secado de pequeñas cantidades de madera aserrada, del orden de 12 a 24 m³, donde los costos de instalación de una caldera son desproporcionalmente elevados en relación con la capacidad total de secado.

Entre las desventajas, pueden mencionarse las siguientes:

- La baja temperatura de funcionamiento del sistema conlleva un aumento notable de los tiempos de secado.
- No permite el acondicionamiento final de la madera para la disminución de las tensiones.
- No constituye una alternativa válida frente al secado en cámaras convencionales, sobre todo para productores en mediana y gran escala y cuando se trata de especies de secado rápido. Sin embargo, para aserraderos y talleres de carpintería pequeños, este sistema podría ser una buena solución, ya que sus bajos costos de instalación y funcionamiento aseguran un buen rendimiento.

Secado al Vacío

El método se basa en que en condiciones de vacío, por un lado, se incrementa considerablemente la velocidad de circulación de la humedad por el interior de la madera (coeficiente de difusión), a 60mm la circulación es cinco veces mayor que a presión atmosférica, mientras que, por otro lado, se disminuye la temperatura de ebullición, se sitúa alrededor de 40 °C. Ambos hechos consiguen que en condiciones de vacío, el secado sea tan rápido, comparado al secado a alta temperatura.

El agua que sale de la madera, en forma de vapor, es succionada hacia el exterior del secado por la acción extractora de una bomba de vacío, o bien condensada en un condensador, y expulsada definitivamente al exterior.

El problema que presente este método es que en este secado térmico, en general, el calor suele ser transmitido a la madera por convección, en este caso al ser el aire muy escaso la citada convección resulta muy limitada.

Por tanto la solución más apropiada para transmitir el calor a la madera en estas condiciones es:

- Interrumpir el vacío y restituir la presión atmosférica (método discontinuo) a intervalos predefinidos para, por convección, calentar la madera.
- Mantener el vacío (método continuo) y calentar la madera por alguno de los métodos siguientes:
 - Por conducción: empleando placas metálicas calefactadas, en contacto directo con la madera. Este sistema exige un apilado especial.
 - Por radiación: mediante el uso de paneles radiantes colocados en la periferia de la pila.
 - Por radiofrecuencia: produciendo un calentamiento simultáneo de toda la masa de la madera, en función de su contenido de humedad.
 - Mediante vapor de agua sobrecalentado: obteniendo sobrecalentado el vapor desprendido de la madera que se seca, y haciendo circular transversalmente a través de la pila por acción de ventiladores, de potencia y diseño adecuado.

Industrialmente los más usados son el discontinuo y el de conducción en el secado al vacío continuo, en la actualidad está ganando adeptos el vapor sobrecalentado.

Como ventajas del método al vacío pueden enunciarse las siguientes:

- Es el más rápido dentro de los de cámara, con excepción del secado a alta temperatura, ya que permite reducir la duración del secado entre 2 a 5 veces respecto del secado tradicional con igual calidad de secado.
- Permite el secado de maderas con grandes espesores.

Entre las desventajas:

- No es conveniente secar mezclas de especies
- El tamaño de la cámara no permite grandes capacidades (25 a 75 m³)
- Requiere altas inversiones, tanto en adquisiciones como en mantenimiento

- El apilado en los secadores continuos por conducción es laborioso

Como conclusión puede decirse que este método está indicado para las pequeñas o medianas empresas transformadoras de la madera, que trabajan con maderas latifoliadas de gran valor y que necesitan un cuidadoso control.

DEFECTOS DEL SECADO, CAUSAS Y CONTROL

El éxito de una compañía de secado depende del conocimiento que tenga el operador de los defectos en la madera aserrada y los métodos para prevenir su ocurrencia. Aunque algunos defectos no se pueden observar en madera verde y son notados después del proceso de secado, ellos son a menudo llamados defectos de secado aun cuando el efecto pudo haberse iniciado en el árbol, la rola o madera aserrada húmeda.

Se entiende por **defecto de secado** cualquier característica en un producto de madera que ocurre durante el proceso de secado y reduce el valor agregado del producto. El objetivo principal es secar la madera económicamente con tan poco desarrollo de defectos como sea posible.

Los defectos de secado pueden ser causados por contracción, por ataques de hongos, por acción química o por ataque de insectos. La contracción es la causa de defectos como endurecimiento, colapso celular, grietas, rajaduras y alabeos. El ataque de hongos ocasiona la mancha azul en la albura. Las reacciones químicas que se presentan durante el secado ocasionan oxidaciones que se manifiestan en cambio de color en las superficies de la madera.

1. Las Tensiones de Secado

Las tensiones que se producen en una pieza de madera durante el secado son de naturaleza diferente, según que su contenido de humedad se encuentre por encima o por debajo del punto de saturación de las fibras.

Por encima del punto de saturación de las fibras, la tensión capilar es la responsable de los esfuerzos que se presentan en la madera y en condiciones extremas puede conducir a un aplastamiento celular conocido como colapso.

Por debajo del punto de saturación de las fibras, las tensiones de secado responsables de la contracción normal de la madera, se desarrollan en las paredes celulares y son una consecuencia del gradiente de humedad que se presenta entre las capas superficiales y el centro de la pieza de madera. En condiciones extremas, estas fuerzas pueden conducir a la aparición de defectos como endurecimiento, grietas superficiales, en los extremos y las internas.

1.1 Contracción

Cuando la madera se seca por debajo del punto de saturación de las fibras, la humedad es removida de las paredes celulares y la pieza se contrae. La anisotropía de la contracción es la causa de la mayoría de los problemas y de la pérdida de un cierto porcentaje de la madera, como consecuencia del secado.

La contracción de la madera depende no sólo del contenido de humedad, sino también de la densidad. A mayor densidad de la madera, mayor es la contracción que puede esperarse para un cambio de humedad dado; en general, las maderas pesadas se contraen más que las livianas.

La madera se contrae principalmente en la dirección tangencial, alrededor de dos veces mayor que en la dirección radial y muy poco a lo largo de la fibra. La contracción longitudinal total de la madera normal oscila generalmente entre 0,1 y 0,3% de la dimensión verde, es decir muy poco.

La contracción de una pieza de madera es proporcional a la pérdida de humedad, por debajo del punto de saturación de las fibras, por cada pérdida de uno por ciento de humedad, la madera se contrae aproximadamente 1/30 de la contracción total posible.

Conociendo la contracción volumétrica de una madera desde verde a seca al horno se puede calcular el porcentaje de contracción de esa madera hasta un contenido de humedad final predeterminado y en consecuencia el volumen final de la carga de madera seca.

Ejemplo: cuantos metros cúbicos de saqui-saqui se obtendrán al secar una carga de 20 m³, con un contenido de humedad inicial de 150%, que se secará a 10% de contenido de humedad final. La contracción del saqui-saqui desde verde a seca al horno es de 9,5%.

Cálculo del porcentaje de contracción mediante la fórmula:

$$C_{10\%} = C_o \left(\frac{30 - CH}{30} \right)$$

Donde: Co es la contracción desde verde a seca al horno

$$C_{10\%} = 9,5 \left(\frac{30 - 10}{30} \right) = 6,33\%$$

Los 20 m³ contrajeron un 6,33%, lo que corresponde a 1,266 m³, es decir, que al terminar el secado se tienen 18,734 m³ de saqui-saqui seco al 10% de CH.

Ahora para obtener 20 m³ de esta misma especie secos al 10%. ¿Cuántos m³ verdes necesitas?

De la fórmula $Vv = \frac{Vs}{100 - C_o} 100$

Donde:

Vv = volumen verde

Vs = volumen seco al 10% de CH

Se necesitan 21,352 m³ de SQ-SQ verde para obtener 20m³ secos al 10% de CH.

1.2 Colapso

El colapso es el resultado de la aplicación de un horario de secado muy severo (gradiente de secado alto) en madera con un contenido de humedad tan alto, donde

las cavidades están completamente llenas de agua libre y donde faltan las burbujas de aire que regularmente se encuentran en las células.

Las principales causas de colapso de la madera durante el secado son: (1) punteaduras pequeñas, (2) alta tensión capilar del líquido a evaporar, (3) células con paredes delgadas y (4) aplicación de temperatura elevadas ($> 50 - 60$ °C) en las etapas iniciales del secado.

El colapso puede evitarse secando lentamente la madera a temperaturas normales, hasta que pierda suficiente humedad como para permitir la formación de burbujas en las cavidades celulares que absorban las tensiones originadas durante la evaporación del agua en las primeras etapas del secado, o también secar al aire las maderas susceptibles de colapso antes de secarlas al horno.

En algunos casos, y cuando no es severo el colapso puede ser removido por reacondicionamiento con vaporización. Este tratamiento básicamente consiste en vaporizar la madera tan cerca como sea posible a 100°C y 100% de humedad relativa, y es más efectivo cuando el contenido de humedad de la madera está cerca de 15% y son requeridas usualmente de 4 a 8 horas.

La madera que ha sufrido colapso, muestra frecuentemente ranuras u ondulaciones en su superficie, y, en algunos casos, puede deformar grandemente la pieza, puesto que las paredes celulares se han roto, la madera pierde resistencia extraordinariamente.

1.3 Endurecimiento

El endurecimiento durante el secado artificial, es una consecuencia de un gradiente fuerte de contenido de humedad en una pieza de madera donde las capas superficiales han perdido mucha agua, mientras que el centro permanece todavía húmedo. Este defecto se debe a la aplicación de un horario de secado severo al iniciarse el proceso, alta temperatura y gran diferencia psicrométrica.

Cuando el endurecimiento se mantiene dentro de ciertos límites no hay peligro para la madera. Sólo al final del secado hay que eliminar el endurecimiento con el fin de obtener maderas sin tensiones, ya que la madera endurecida se tuerce durante procesos posteriores de maquinado. Si una pieza de madera endurecida es reaserrada, las dos piezas resultantes se arquean una hacia la otra, apretando la sierra.

El método usual para detectar la presencia del defecto de endurecimiento es la prueba de tenedor y, se considera como un defecto grave cuando la madera que lo presenta va a ser reaserrada. Puede ser corregido por vaporización o acondicionamiento de la madera en el horno durante varias horas al final del secado. Una práctica común, recomendable para maderas de coníferas, es disminuir la diferencia psicrométrica en 10 °C por cada 25mm de espesor de la pieza, conservando esta condición durante 30 minutos.

Debe tenerse presente que una vaporización excesiva puede conducir a un fenómeno contrario al endurecimiento, en el cual se invierten los esfuerzos de tensión y

comprensión. Esta condición es tan indeseable como el propio endurecimiento, pero puede usualmente remediarse con un secamiento adicional para remover el exceso de humedad en la superficie.

1.4 Grietas Superficiales

Estas son fallas que usualmente ocurren en los radios de la madera en dirección radial y longitudinal que no alcanza a afectar dos caras de una pieza, o dos puntos opuestos de la superficie de una madera rolliza. Ellas ocurren debido a que los esfuerzos de secado exceden la resistencia perpendicular a la fibra, y son causadas por esfuerzos de tensión que se desarrollan en la parte externa de la pieza cuando se seca. Las grietas superficiales también pueden ocurrir en los conductos resiníferos y en las fajas minerales.

Estas grietas ocurren en las primeras etapas del secado, pero en algunas coníferas el peligro persiste. Humedades relativas bajas contribuyen al desarrollo de estas grietas porque la superficie seca demasiado rápida creando esfuerzos de tensión. Las piezas anchas y gruesas son más susceptibles a agrietarse que las angostas y delgadas.

La mayoría de las grietas superficiales, especialmente la de las latifoliadas cierran en las últimas etapas del secado, cuando los esfuerzos se reversan, es decir, la tensión cambia a compresión.

La aceptación de piezas con grietas superficiales va a depender del uso final del producto. Por ejemplo para material de construcción se permiten moderadamente. La suma de sus profundidades, medidas desde ambos lados, no debe exceder un cuarto del espesor del espesor de la pieza.

Las piezas secadas al aire que presentan grietas superficiales no deben ser expuestas a altas humedades relativas durante el secado al horno porque estos tratamientos frecuentemente, alargan, amplían y profundizan las grietas, igualmente si después del secado hay grietas abiertas la exposición a cambios de humedad las alargan.

1.5 Grietas y Rajaduras en los Extremos

Las grietas en los extremos igual que las superficiales usualmente ocurren en los radios, pero en los extremos de la madera. Las rajaduras son separaciones naturales entre los elementos de la madera que se extienden en la dirección del eje de la pieza y afectan totalmente su espesor, o dos puntos opuestos de una madera rolliza.

Las grietas en los extremos ocurren debido a que el movimiento de humedad es mucho más rápido en la dirección longitudinal que transversal. Ellas también ocurren en las primeras etapas del secado y pueden ser minimizadas usando humedades relativas altas y/o cubriendo los extremos con un producto impermeabilizante. También, la tendencia a grietas en los extremos se vuelve mayor cuando se incrementa el ancho y el espesor de la pieza.

Las rajaduras a menudo resultan de la extensión de las grietas en los extremos, una manera de reducirlas es colocar separadores lo más cerca posible de los extremos de

la pieza. Las rajaduras a veces son causadas por esfuerzos de crecimientos y por lo tanto no son defectos de secado, pueden estar presentes en las rolas o en algunos casos se desarrollan inmediatamente que las rolas son aserradas.

Las rajaduras se observan como separaciones del tejido leñoso en la dirección del grano en material para construcción se permite sólo en uno de los extremos de la pieza y de una longitud no mayor al ancho o cara de la pieza.

1.6 Honeycomb o Grietas Internas

Estas ocurren cuando los esfuerzos de tensión perpendicular al grano y de cizallamiento son superiores a la resistencia de las maderas. Este defecto ocurre cuando el centro de la pieza aun está a altos contenidos de humedad y se aplican temperaturas altas por largo tiempo. De esta manera el honeycomb puede ser minimizado evitando temperaturas altas hasta que toda el agua libre haya sido evaporada.

El honeycomb puede resultar en severas pérdidas de volumen de madera. En muchos casos no se observa el defecto en la superficie de la madera sino cuando es procesada. La madera con honeycomb severo, frecuentemente tiene una apariencia corrugada sobre la superficie y el defecto es a menudo asociado con colapso severo y la madera prácticamente no tiene uso.

2. Alabeo

Como alabeo se entiende la deformación que puede experimentar una pieza de madera por la curvatura de sus ejes longitudinal, transversal o ambos. Los casos más frecuentes son: abarquillado, arqueadura, encorvadura y torcedura.

Los alabeos pueden causar pérdidas significativas de volumen y de grado (clasificación). Todos los alabeos pueden ser originados por dos causas: diferencia entre contracción radial, tangencial y longitudinal en la pieza a medida que seca, o por esfuerzos de crecimiento. También es agravado por grano irregular o entrecruzado y por la presencia de madera de tipo anormal como madera juvenil y madera de reacción.

La mayoría de los alabeos causados por contracción pueden ser minimizados apilando apropiadamente las piezas. Los efectos de esfuerzos de crecimiento son más difíciles de controlar, pero ciertas técnicas de aserrado son efectivas.

2.1 Abarquillado

Es el alabeo de las piezas cuando las aristas o bordes longitudinales no se encuentran al mismo nivel que la zona central. Se reconoce al colocar la pieza de madera sobre una superficie plana se apoyará la parte central de la cara quedando levantados los cantos, presentando un aspecto cóncavo o de barquilla.

El abarquillado aparece en las primeras etapas del secado y se incrementa a medida que progresa el secado, es mayor mientras mayor sea la diferencia entre la contracción tangencial y radial.

Una tabla cortada cerca de la corteza tiende a abarquillar menos que una cortada cerca de la médula, debida que a la curvatura de los anillos es menor cerca de la corteza. Similarmente tablas de árboles de pequeños diámetros contraen más que aquellos de mayor diámetro. El abarquillado puede ser reducido evitando sobresecado y un buen apilado es la mejor vía para minimizarlo.

Para madera de construcción, este defecto se permite en forma leve, no mayor de uno por ciento del ancho de la pieza.

2.2 Encorvadura

Es el alabeo o curvatura a lo largo de los cantos en sentido longitudinal, es asociado con la contracción longitudinal en madera juvenil, madera de reacción y grano desviado. Se reconoce al colocar la pieza sobre una superficie plana se observará una luz o separación entre el canto de la pieza de madera y la superficie de apoyo. Se ubicará el lugar de mayor distanciamiento para ser medido.

La causa es la desviación en la contracción longitudinal en ambos cantos de la pieza. Asumiendo que no hay presencia de grano desviado sobre los cantos, la encorvadura no ocurriría si la contracción longitudinal es la misma sobre el canto opuesto. En madera para construcción se permite 1cm por cada 300cm de longitud o su equivalente: $\frac{H}{L} < 0,33\%$.

2.3 Arqueadura

Es el alabeo o curvatura a lo largo de la cara de la pieza. Se reconoce al colocar la pieza sobre una superficie plana se observará una luz o separación entre la cara de la pieza de madera y la superficie de apoyo. Un buen apilado ayudaría a reducirlo. En madera para construcción se permite 1cm por cada 300cm de longitud o su equivalente: $\frac{H}{L} < 0,33\%$.

2.4 Torcedura

Es el alabeo que se presenta cuando las esquinas de una pieza de madera no se encuentran en el mismo plano. Se reconoce al colocar una pieza sobre una superficie plana se observará el levantamiento de una o más aristas en diferentes direcciones. Ocurre en madera de grano en espiral, inclinado, torcido o entrecruzado. La torcedura puede ser minimizada con un buen apilado. En madera para construcción se permite solamente cuando este defecto se presenta en forma muy leve y en una sola arista. Se permite 1cm de alabeo para una pieza de 3m de longitud.

La torcedura, arqueadura y encorvadura tienen asignados límites definidos en las reglas de clasificación de madera dimensionada de coníferas, por lo que deben minimizarse para evitar la pérdida de calidad y en consecuencia del valor agregado.

3. Decoloración

Puede ocurrir por varias causas antes y durante el secado. Para secar maderas con problemas de decoloración es conveniente aplicar horarios de secado suaves con temperaturas bajas, ya que las temperaturas altas tienden a oscurecer las maderas.

HORARIOS DE SECADO

Un programa u horario de secado consiste en una secuencia de condiciones climáticas, temperatura y humedad relativa del aire, aplicables durante etapas de secado previamente establecidas para una determinada especie.

Para una correcta conducción del secado, el operario de la cámara deberá, además de conocer las características del material a secar y el funcionamiento de la secadora, tener una amplia experiencia en el manejo de programas de secado que le permita en cualquier momento hacer modificaciones o detectar fallas durante el transcurso del proceso.

Los programas de secado varían según la especie, las dimensiones (espesor) y la calidad de la madera a secar, los cambios de temperatura y humedad relativa dentro del horno se fundamentan en un *tiempo* de secado predeterminado para una fase climática o en función del *contenido de humedad de la madera*. Algunas casas productoras de cámaras, principalmente Europeas, conducen el proceso del secado utilizando el concepto de *gradiente de secado*, que es la relación que existe entre la humedad de una madera (CH) y su contenido de humedad de equilibrio (CHE) para las condiciones climáticas de la cámara en un momento dado.

En todo proceso de secado convencional se cumplen las siguientes fases:

➤ Fase de Calentamiento

Es la primera fase del ciclo y se activa al inicio del proceso. La madera es llevada de su temperatura inicial a la pre-establecida por la fase sucesiva del secado.

El aumento de temperatura debe ser gradual por unidad de tiempo y no una función de la capacidad de producción de calor de la caldera o del sistema de calefacción del secador. Si el aumento de temperatura es regulado y uniforme, se evita la aparición de tensiones en la madera por diferencias demasiado pronunciadas entre la temperatura interna y la externa.

Como regla general, el calentamiento debe ser, en el caso de madera muy húmeda, en lo posible lento, mientras que la madera presecada puede soportar calentamientos más fuertes.

Durante esta fase, el clima debe mantener una humedad relativa alta (85 a 95%), para evitar un secado prematuro de la superficie de las piezas, caso en el que se tendría un inevitable endurecimiento superficial de la madera. Si durante la calefacción se utilizan los vaporizadores, siempre a partir de los 30-40 °C. La humificación no debe ser continua sino periódica a fin de no aportar agua en exceso.

La duración de la fase de calefacción es proporcional a la naturaleza de las especies y al espesor de la madera. **Como regla general se calcula una hora de calentamiento por centímetro de espesor para maderas livianas y dos horas por centímetro para las maderas densas, cuando su contenido de humedad es superior al 30%.**

➤ Fase de Secado

Es ésta la fase principal de todo proceso de secado, fase en que se elimina gran parte de la humedad de la madera contenida en las fibras y que, si quedara, perjudicaría su correcta elaboración (corte, cepillado, barnizado, entre otros), con una consecuente desvalorización comercial.

Aquí se lleva la humedad de la madera del valor inicial al valor predeterminado elegido por el usuario. Los modos de operar y conducir el secado son extremadamente variables y diferentes según el tipo de madera y de las condiciones de contenido

Se pueden identificar dos periodos internos a la fase de secado: un primer periodo en que la humedad de la madera está por encima del Punto de Saturación de las Fibras y un segundo cuando el CH se encuentra por debajo del PSF.

En el primer periodo el peso de la madera está mayormente constituido por agua; difícilmente se manifestará durante éste fenómeno la contracción. La medición de la humedad de la madera puede ser solamente aproximada. El secado se lleva a cabo a altos contenidos de humedad relativa, mientras la temperatura se mantiene constante o se incrementa en forma cuidadosamente gradual.

En el segundo periodo se elimina el agua en el interior de las paredes celulares y tiene lugar el fenómeno natural de reducción del volumen de la madera (contracción). En este periodo se podrá elevar la temperatura y aplicar sobre la madera un aire cada vez más seco, hasta llegar al contenido de humedad final.

En función del destino final de la madera, de la especie, de la calidad final deseada, de la experiencia, de los tiempos de secado deseados se podrá elegir el programa de secado adecuado que mejor se adapte.

➤ Fase de Acondicionamiento

Cuando la madera ha alcanzado en el centro o en el tercio de su espesor, la humedad final deseada, su superficie tendrá un contenido de humedad inferior. Esta diferencia será mayor cuanto más gruesa sean las piezas y cuanto más rápido ha sido el secado.

Una excesiva diferencia podría inducir tensiones capaces de producir sobre el producto terminado fenómenos de torsión, alabeos y hasta fisuras.

En la fase de acondicionamiento se crea un clima más húmedo que en la fase precedente mediante la vaporización o, si fuese necesario disminuyendo la temperatura. De este modo las superficies reciben humedad mientras en el interior de

las tablas prosigue el propio proceso de secado. El resultado es una reducción de la diferencia de humedad entre estratos.

Si el secado se realiza muy lentamente, o sea con temperaturas moderadas y con un gradiente limitado, la fase de acondicionamiento es superflua.

El tiempo de acondicionamiento depende del valor del gradiente de humedad en la madera, de su espesor y de la especie considerada. [Un tiempo doble al contemplado para el calentamiento es un orden de magnitud válido para muchos casos.](#)

➤ Fase de Enfriamiento

Durante esta última fase es necesario bajar la temperatura progresivamente hasta un valor compatible con la temperatura exterior y mantener una humedad relativa casi igual a la fijada durante el acondicionamiento.

Dada la amplia variabilidad en el comportamiento de las maderas ante la intensidad y frecuencia de los cambios climáticos, podría resultar una lista muy amplia de programas de secado. Para evitarlo, se han establecido agrupaciones de maderas con características similares, bajo un mismo programa.

Hasta la fecha se han publicado un gran número de programas de secado, por varios laboratorios de investigación en todo el mundo. Entre los más importantes tenemos los del laboratorio de investigación de Productos Forestales (FPRL) de Princesa Risborough-Inglaterra, los programas de secado basados en gradientes de secado (GS), los programas de secado de la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC) y los programas de secado del Laboratorio de Productos Forestales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Estos programas u horarios se dan como guía. La selección de un horario de secado deberá basarse en un entendimiento del encargado del secador con la calidad del secado que desea conseguir, defectos de secado admisibles, porcentaje de humedad promedio final, grado de uniformidad de la humedad y estado final de tensiones.

Los horarios de secado generales son lo suficientemente conservadores, como para que la carga una vez seca, tenga un mínimo de defecto y se lleva a cabo en un tiempo razonablemente corto. El encargado no debe hacer estos horarios más conservadores a menos que saque una carga anormal o que el secador no reúna las condiciones precisas.

Con secadores diseñados y conservados apropiadamente es posible modificar estos horarios generales, para acortar el tiempo de secado.

TIEMPO DE SECADO

Este es el parámetro que, tal vez, más interesa a quien debe secar maderas de la madera, y tantos otros factores; por tales motivos se lo puede calcular solo en forma aproximada. Pero lamentablemente es de difícil previsión. El tiempo de secado está, efectivamente, sujeto a muchos factores y por lo tanto muy variable: según la especie, el espesor

Así, la velocidad de secado se ve influida por:

1. Estructura y densidad de la madera
2. Espesor de la madera
3. Humedad inicial y final de la madera
4. Sistema de apilado
5. Conducción de las operaciones de secado

El tiempo de secado es un factor determinante en la elección del procedimiento y tipo de secado más apropiado. En efecto, este factor condiciona los tiempos de inmovilización de la materia prima, con la consecuente incidencia en el flujo de producción de la empresa y en los volúmenes de madera almacenados.