

CAPÍTULO 5

Valor agregado en madera aserrada: secado y remanufactura

Eleana M. Spavento y M. Mercedes Refort

Consideraciones generales

La madera aserrada es destinada a aplicaciones estructurales y no estructurales con requerimientos propios que deben ser tenidos en cuenta para permitir su apropiado uso. Un factor determinante en este sentido, es la adecuación de su contenido de humedad a las condiciones de servicio, el cual es obtenido a través de diferentes procesos de secado. Del mismo modo, dado que es un material biológico con presencia de singularidades (anomalías) que afectan su resistencia, debe realizarse un proceso de clasificación a fin de definir su influencia y consecuente aptitud de uso. Por su parte, la transformación secundaria del material aserrado (remanufactura), implica una serie de actividades tendientes a la producción de elementos de madera reconstituida de mayor valor agregado.

En el presente capítulo se retomarán los aspectos más importantes de la madera aserrada y se abordarán los temas referentes a los procesos de secado, clasificación y remanufactura de mayor difusión en nuestro país.

Madera aserrada: definición

Tal como se mencionó en los Capítulos 2 y 3, se define como madera aserrada a todo material con espesor, ancho y largo definido, obtenido a partir de un sistema de aserrado aplicado a un rollizo de madera. Si bien las partes y términos geométricos que la definen fueron desarrollados en el Capítulo 3, a continuación se representan gráficamente y detallan otras referencias, indicadas en la IRAM 9670 (2002), utilizadas fundamentalmente durante el proceso de clasificación (Figura 5.1).

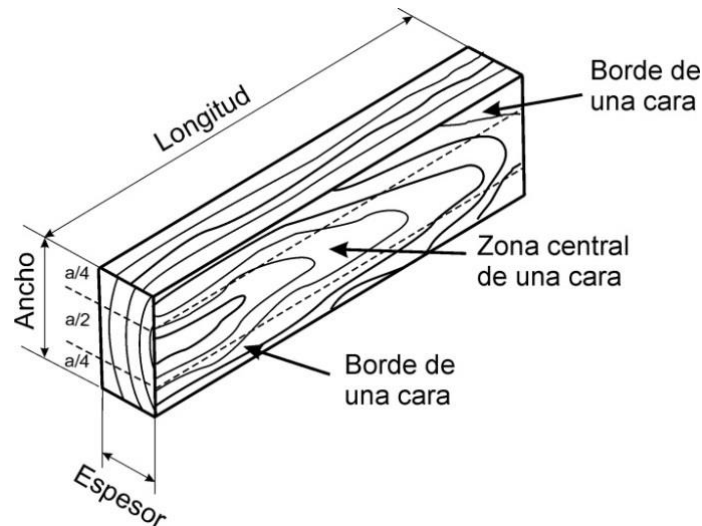


Figura 5.1. Partes de madera aserrada.
Fuente: Spavento & Keil (2008).

Borde de una cara: zona de la superficie de una cara que abarca todo el largo de la pieza; está comprendida entre una arista y una línea que pasa por la cuarta parte del ancho de la cara (25% de la cara); la cara tiene dos bordes.

Zona central de una cara: zona de la superficie de la cara que abarca todo el largo; está comprendida entre las líneas de las zonas borde de la cara (50% de la de la cara).

Asimismo, cabe aclarar que se denomina **madera aserrada estructural** al elemento lineal de sección rectangular, que ha sido clasificado estructuralmente por alguno de los procedimientos reconocidos en las normativas que se detallarán más adelante en este capítulo (clasificación visual o mecánica). Algunos ejemplos de este tipo de madera se encuentra en las estructuras (de luces variadas) empleadas en muros, viguetas, cubiertas de madera, entre otros. Por su parte, la **madera aserrada no estructural** es aquel elemento lineal, de sección rectangular o cuadrada, que no ha sido clasificado dentro de los grados estructurales. Las aplicaciones más frecuentes pueden ser: revestimientos al exterior, pisos de interior y exterior (*deck*), muebles de jardín, aberturas, entre otros (Galván, 2018).

Proceso de secado

El proceso de secado consiste en eliminar el exceso de agua de la madera bajo condiciones rápidas, económicas y sin ocasionar defectos, u ocasionando la menor cantidad posible, convirtiéndola de este modo, en un material apropiado para distintas aplicaciones industriales.

Un concepto básico en este proceso es el contenido de humedad (CH), el cual queda definido como la relación entre el peso de agua de una pieza y su peso anhidro (Fórmula 5.1), constituyendo un factor determinante para el uso apropiado de la madera.

$$CH (\%) = \frac{Ph - Po}{Po} \times 100 \quad (5.1)$$

Siendo: CH: contenido de humedad, en %; Ph: peso de la probeta seca al aire, en g; Po: peso anhidro obtenido mediante secado en estufa a 103±2°C, hasta peso constante, en g.

En términos generales, la importancia del secado consiste en una serie de ventajas que se enumeran a continuación (Fernández Golfín Seco & Conde García, 2007; JUNAC, 1989):

- Permite la estabilización dimensional de la madera frente a variaciones en su CH.
- Aumenta su resistencia mecánica y biológica (agentes de deterioro).
- Mejora las propiedades de aislación térmica, eléctrica y acústica.
- Reduce su peso, favoreciendo su manipulación y traslado
- Mejora la trabajabilidad, adhesividad, aplicabilidad y anclaje de productos protectores de la madera (tratamientos superficiales e impregnación profunda en autoclave).

En este sentido, el uso de un elemento de madera con un CH acorde a las condiciones de servicio, garantiza, en gran parte, sus prestaciones durante un prolongado tiempo. Al ser un material poroso, la madera absorbe o pierde humedad del ambiente, siempre que no exista igualdad entre las presiones parciales de vapor del aire circundante y del cuerpo húmedo. Mientras estos valores de presión sean diferentes, habrá transferencia de humedad del material al ambiente y viceversa. Cuando esas presiones de vapor se igualan, se alcanza el estado de humedad de equilibrio del material. Dicho estado depende de factores como la densidad, el espesor, el contenido de extractivos, entre otros (JUNAC, 1989). Por lo que, para cada situación de uso, la madera deberá alcanzar un contenido de humedad de equilibrio higroscópico (HEH) determinado, el cual queda definido por las condiciones de humedad relativa y temperatura del ambiente a las cuales se encontrará expuesta.

Para estimar el CH de una manera rápida, existen equipos de determinación indirecta denominados xilohigrómetros, los cuales no imposibilitan el uso posterior de la madera. Estos pueden ser de determinación no destructiva, cuando su uso no implica la rotura o el marcado del material, o pseudo-no destructiva, cuando implica el marcado de la superficie. El primero de ellos, es indicado en la Figura 5.2, cuyo funcionamiento es a través de radio frecuencia (determinación por diferencial de potencia); para la determinación del CH, este higrómetro es apoyado en la madera; el segundo de ellos, es ejemplificado en la Figura 5.3 y su funcionamiento es a través de resistencia eléctrica (determinación a través de dos electrodos); para la determinación del CH, los electrodos son insertados en el material. Dicha resistencia es función de la resistividad de la madera, la cual a su vez depende de su CH.

En este sentido, existe una relación aproximadamente lineal entre el logaritmo de la resistencia eléctrica y el contenido de humedad de la madera, en el rango entre 6% y 25% de CH. Por debajo del 6%, la resistencia se eleva de un modo tal, que no es posible su determinación con este tipo de aparatos, y por encima del 25% de CH, la relación disminuye debido a la dispersión natural de los valores medios, y por lo tanto, las lecturas obtenidas, no son precisas. La

temperatura de la madera afecta los valores de la resistencia eléctrica, por lo que la lectura efectuada con aparatos eléctricos debe ser corregida de acuerdo a ella.



Figura 5.2. Xilohigrómetro de contacto-LIMAD.
Fuente: propia (2020).

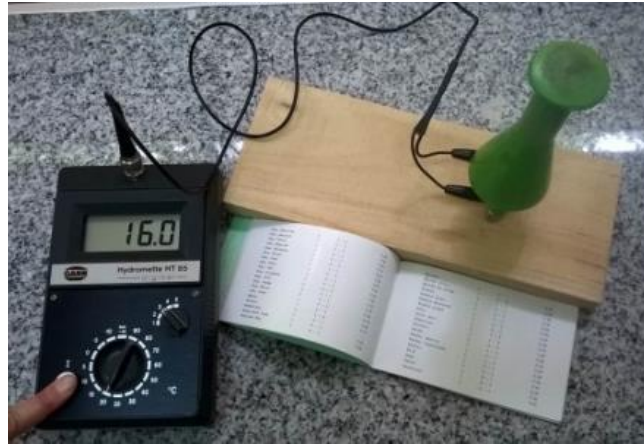


Figura 5.3. Xilohigrómetro de resistencia-LIMAD.
Fuente: propia (2020).

Elementos de control y organización del proceso de secado

El secado de la madera puede llevarse a cabo de manera natural o bien, mediante secado técnico en cámara. En ambos casos, el agua es removida de la superficie de la madera por evaporación, cuya velocidad es controlada por la temperatura, humedad del ambiente y velocidad del aire (JUNAC, 1989).

Temperatura (T°)

Es la fuente de calor que la madera requiere para que las moléculas de agua adquieran la energía cinética para su evaporación. En el secado natural, la T° es propiciada por la radiación directa del sol; no es regulable ni controlable. En el secado técnico, la T° es aportada por radiación directa suministrada por una fuente externa (caldera para generarla y radiadores para distribuirla), y es controlada con el termómetro de bulbo seco del psicrómetro del secadero.

Humedad relativa del aire (HR)

Es la relación entre la presión parcial del vapor de agua presente en el aire y la presión de vapor saturado a la misma temperatura, expresada en porcentaje (%).

En el secado natural, la HR se determina a través de un higrómetro; en el caso del higrómetro de cabello, el equipo se basa en la propiedad del cabello de elongarse y contraerse cuando el aire está húmedo y seco, respectivamente. Dicho movimiento es transmitido, mediante un sistema de palancas, a una aguja que indica la HR circundante en un dial. En el secado técnico, la HR se determina en forma indirecta a través de tablas psicrométricas, que consideran datos de temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo, a lo cual se le denomina diferencia psicrométrica (Δ psicrométrica). El bulbo seco indica la temperatura real del aire y su valor es superior a la del

bulbo húmedo (excepto al 100% de HR), ya que en este caso, está cubierto por una tela húmeda que al evaporar parte de dicha humedad, sufrirá un enfriamiento. El equipo que contiene ambos termómetros se denomina psicrómetro.

Velocidad del aire (VA)

Es la variable necesaria para transmitir y distribuir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera, facilitando su evaporación y transportando la humedad saliente de la madera. A mayor VA, mayor tasa de evaporación y menor tiempo de secado, y viceversa. Por ello, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación fuerte y regular del aire, sin perder de vista la calidad de la madera.

En el secado natural la velocidad del aire (viento) no puede controlarse. En el secado técnico la velocidad del aire es regulada y controlada a través de ventiladores, y es medida con anemómetros.

Por lo expuesto, el proceso de secado podría definirse como el resultado del movimiento de la humedad de la madera desde el interior hasta la superficie, donde se evapora y escapa a la atmósfera circundante (JUNAC, 1989). En este sentido, se tiene en cuenta el concepto de capa límite, que es la capa de aire cercana a la madera, más saturada de humedad; a dicha capa le circunda el aire más externo que también la rodea. Cuanto menor sea el espesor de la capa límite, más efectivo será el secado, ya que debe ser removida permanentemente para bajarle su tenor de humedad, permitiendo que el agua de la madera pase al aire. La VA aumenta la tasa de evaporación, pero se debe evitar generar un ambiente muy seco que acelere demasiado el proceso de secado y en consecuencia, genere defectos en la madera (Figura 5.4).

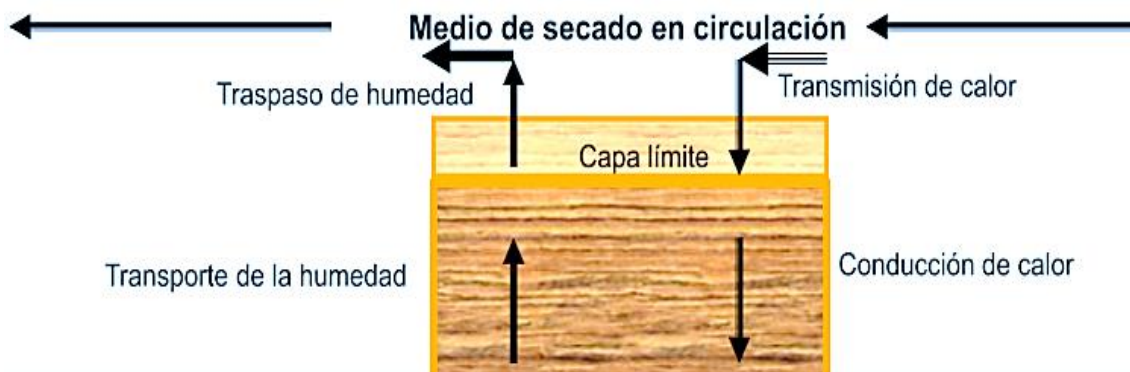


Figura 5.4. Esquema capa límite.
Fuente: Atencia (s.f.).

Estibado de la madera

Una consideración general para el secado natural y para el secado técnico, es la similitud en la preparación-organización del material objeto de secado, es decir en el armado de las estibas de madera. En primer término, no deberían mezclarse especies ni espesores; en el caso que eso suceda, la situación más desfavorable será la que “regule” el proceso de secado, esto es, mayores espesores y especies con dificultad de secado, se colocan en los sectores más expuestos de las pilas (parte superior y exterior).

En cuanto al armado de la estiba *per se*, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones (Figura 5.5): la primera fila de tablas a estibar debe estar colocada sobre bases o travesaños, separadas del suelo a una altura de 0,5 m, permitiendo la circulación del aire húmedo por debajo. Cada capa debe estar separada a través de listones denominados separadores, siguiendo las especificaciones de distanciamiento presentadas en Tabla 5.1. Cada tabla a secar debería estar una cercana a la otra dejando un espaciamento entre ellas (o sea, sin contacto), aunque en la práctica es complicado llevarlo a cabo, razón por la cual, se suelen poner en contacto canto con canto.

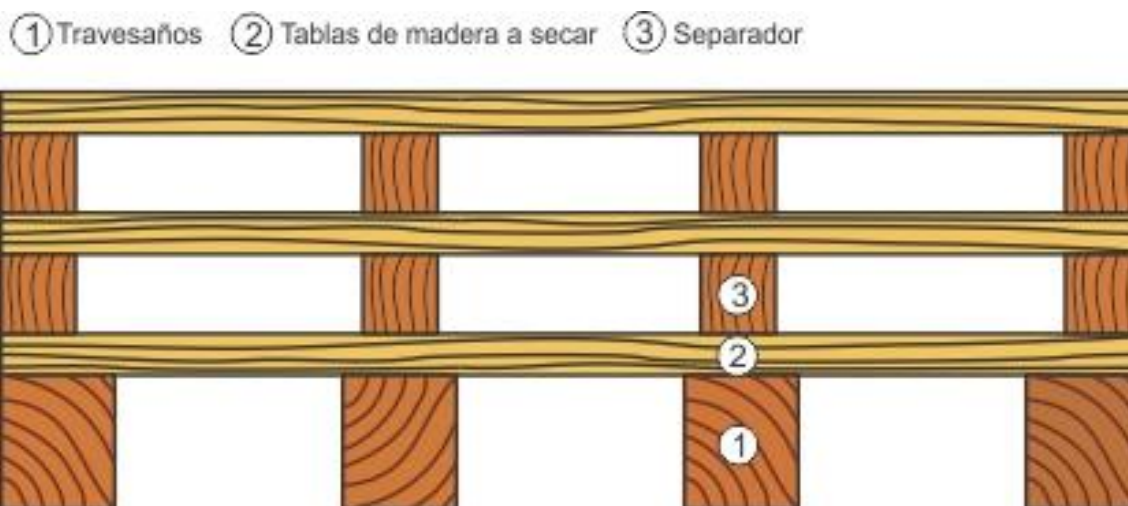


Figura 5.5. Representación general de la estiba.
Fuente: adaptada de Atencia (s.f.).

Espesor de la madera a secar (mm)	Distanciamiento de los separadores (m)
Hasta 30	0,30 – 0,40
30 - 50	0,40 – 0,70
Más de 50	0,70 – 1,00

Tabla 5.1. Distribución de los separadores según el espesor de la madera a secar.
Fuente: Atencia (s.f.).

Las bases pueden ser de cemento o de madera, de sección rectangular y de longitud igual al ancho de la pila. Los separadores deben ser, preferentemente, de la misma especie a secar o de características tecnológicas similares para evitar comportamientos diferenciales durante el proceso de secado; de espesores uniformes, en general entre 20 y 50 mm, dependiendo del espesor de la madera a secar; deben estar correctamente escuadrados; y deben encontrarse con contenidos de humedad de equilibrio higroscópico a fin de evitar cambios dimensionales que repercutan en la estabilidad de la pila durante el período de secado. Los separadores externos deben estar alineados con las cabezas de las tablas, formando un plano, a fin de controlar la aparición o evolución de grietas y/o rajaduras de cabeza; las cabezas de las tablas deben estar alineadas capa por capa. En caso de existir diferencias de longitud entre las tablas, la estiba debe realizarse alineándolas en uno de los dos extremos de la misma, alternando el

alineado entre los dos extremos para asegurar un soporte suficiente y una buena distribución del peso. Por su parte, si se estiba más de una pila encima de otra, cada una debe ir separada con bases similares a las colocadas al iniciar el armado de la estiba. A fin de evitar deformaciones en las tablas superiores, se le deben agregar contrapesos en la parte superior de la pila (Atencia, s.f.; JUNAC, 1989).

En el **secado natural**, si la estiba se coloca sobre un suelo natural, además de colocarse elevada del piso tal como se mencionó anteriormente, debe contar con terreno consolidado, libre de obstáculos y malezas, para una adecuada ventilación, con buen drenaje y/o con pendiente que evite el encharcamiento y permita el traslado y las operaciones de apilado. La estiba debe ubicarse con orientación Norte-Sur o en sentido perpendicular al viento predominante de la zona, a fin de evitar la aparición de grietas y rajaduras de cabeza.

El patio de secado debe diseñarse de manera tal, que contemple calles de distintas jerarquías y caminos cortafuegos que permitan evitar la propagación de incendios y mejorar la circulación del aire. De esta manera, deben preverse calles principales que faciliten el transporte y el apilado; calles transversales, perpendiculares a las anteriores que eventualmente sirvan como barreras cortafuegos; calles laterales entre pila y pila en sentido lateral, que actúen como barreras de protección a determinados defectos; y calles posteriores, ubicadas en los extremos de las pilas. En términos generales, la orientación de las calles principales está en relación a la dirección de los vientos predominantes, o de acuerdo a los puntos cardinales según se quiera evitar o aprovechar la radiación solar; la separación entre estibas debe ser de aproximadamente 50 cm, a fin de permitir la correcta circulación del aire (Figura 5.6) (Atencia, s.f.; JUNAC, 1989).

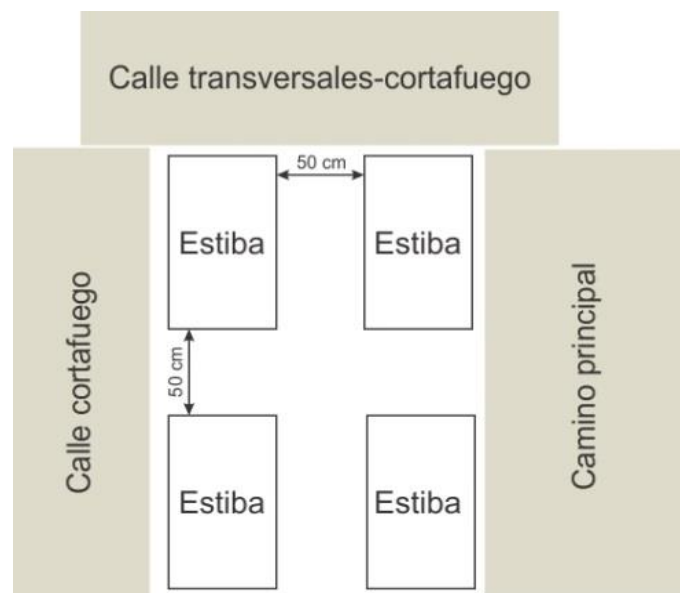


Figura 5.6. Esquema del patio de secado natural.
Fuente: adaptada de Atencia (s.f.).

En el **secado técnico**, la estiba debe colocarse en sentido perpendicular a la circulación del aire de los ventiladores. Los controladores de humedad de la madera (sondas-electrodos) deben estar colocados de manera de cubrir las zonas más desfavorables de la estiba y de la

cámara, y deben ser colocados de a pares en sentido perpendicular a la fibra de la madera, con un distanciamiento entre 25-30 mm y, preferentemente, en el centro de la tabla, a 0,5 m de las cabezas de las mismas.

Parámetros del proceso de secado

Gradiente de humedad (GH)

Al colocar la madera húmeda en contacto con un ambiente seco, las diferencias entre las presiones parciales de vapor de la atmósfera y del agua contenida en la madera dan lugar, en principio, a la evaporación del agua de las capas superficiales, permaneciendo húmedas las capas internas. La diferencia de CH que se establece entre el centro y la superficie de una pieza se denomina **gradiente de humedad**, y origina la circulación interna del agua desde el centro a la periferia permitiendo la evolución del secado.

Cuando se iguala el contenido de humedad del centro de la madera con el de la superficie y el del ambiente, el proceso de secado se detiene o ha culminado. En la práctica, se acepta un GH de hasta 2% que implica una diferencia de 2% entre el CH interno de la madera, más húmedo, y el superficial, más seco.

En el secado natural este parámetro no es controlable. En el secado técnico, este parámetro es controlado a través de muestras de control denominadas “probetas estratificadas”, que serán desarrolladas en este capítulo en las etapas del secado técnico.

Gradiente de secado (GS)

Para el correcto seguimiento del proceso de secado se debe tener en cuenta el contenido de humedad real de la madera en un momento determinado, y la HEH hacia la cual tiende, de acuerdo a las condiciones de T° y HR fijadas dentro del secadero o establecidas de manera natural. La relación o cociente entre estos dos valores se denomina **gradiente de secado**. De su magnitud depende la forma y el progreso de secado, y se establece entre un valor de 2 y 3 (adimensional), dependiendo de la especie y de la etapa del proceso (JUNAC, 1989).

En el secado natural, este parámetro no es controlable. En el secado técnico, este parámetro es controlable y previsto en el programa de secado, verificando el CH de la madera con sensores de humedad, y la HEH del ambiente a través de una placa de celulosa o de una madera sensible a los cambios de humedad del ambiente.

Secado natural

El secado natural o al aire libre consiste en exponer la madera a la acción de los factores climáticos del lugar, tales como temperatura, humedad relativa de la atmósfera y viento, estableciendo un equilibrio dinámico de humedad entre el medio ambiente y la madera. Este

proceso puede ser realizado a la intemperie, bajo dosel o bajo cubierta de tinglado (Figuras 5.7; 5.8 y 5.9, respectivamente).

Durante este proceso, sólo puede alcanzarse como resultado final, aquel contenido de humedad de la madera en equilibrio con las condiciones climáticas del sitio. Por lo tanto, el tiempo requerido para alcanzar la HEH es prolongado (varios meses) y en algunas ocasiones, dependiendo del tipo de uso, no es posible lograrse sino es a través del secado técnico. Dada la imposibilidad de controlar el gradiente de humedad, este proceso dependerá exclusivamente de las condiciones del medio ambiente.



*Figura 5.7. Secado natural a la intemperie (Abra Ancha, Neuquén).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2006).*



*Figura 5.8. Secado natural bajo dosel (Quechuquina, Neuquén).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2018).*



*Figura 5.9. Secado natural bajo tinglado-INTA (Trevelin, Chubut).
Fuente: propia (pasantía estudiantil, 2015).*

Secado técnico en cámara

El secado técnico en cámara es el procedimiento industrial aplicado para acelerar el proceso de secado de la madera, permitiendo llegar a contenidos de humedad imposibles de alcanzar con un secado natural (JUNAC, 1989). La cámara consiste en un recinto herméticamente cerrado, también denominado horno, que presenta condiciones climáticas diferentes a las condiciones atmosféricas normales (Figura 5.10). Si bien existen varios tipos de secados técnicos, el más utilizado es el convencional de aire caliente climatizado, modalidad aplicada en el CTM.



*Figura 5.10. Cámara de secado-CTM.
Fuente: propia (2020).*

En términos generales, las **cámaras** de secado están dotadas de **sistemas de calefacción** (calderas como fuente de energía y radiadores como disipadores de la misma), **sistemas de ventilación** (moto-ventiladores de funcionamiento reversible), **sistemas de humidificación** (tuberías de conducción de vapor con válvula de control), **sistemas de medición** (controladores de temperatura, sensores de HEH y sensores de humedad de la madera, generalmente ubicados en una oficina de control), **chimeneas, tablero eléctrico e instrumental de control** (computadora, procesador, módulo de control-medición y controlador programable de interfase de entradas y salidas) (Gottert, 2017; JUNAC, 1989). Cabe destacar que la cámara de secado del CTM (Figura 5.10) presenta, además de los sistemas indicados, un sistema de vaporizado mixto que permite atomizar agua fría en la línea de vapor, disminuyendo su temperatura y eliminando la posibilidad de sobrecalentamiento y aparición de defectos, especialmente en la etapa de acondicionamiento (Gottert, 2017). Un esquema general de una cámara de secado se indica en el Figura 5.11.

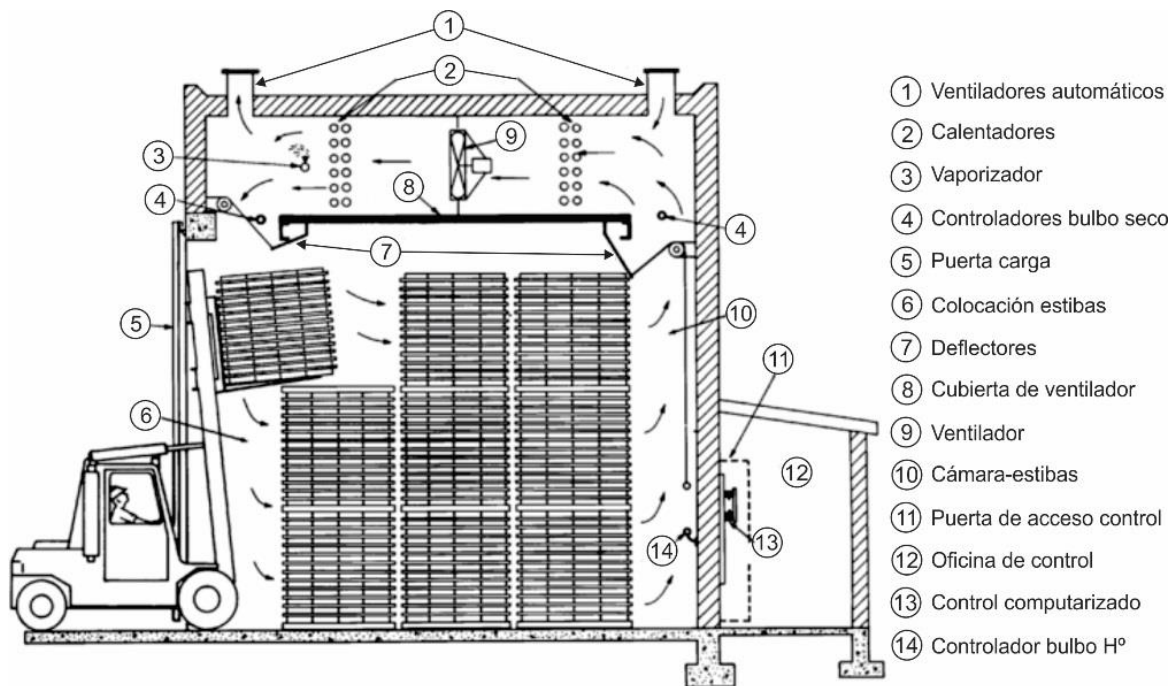


Figura 5.11. Esquema general interior de una cámara de secado y carga.
Fuente: Bergman (2010) con modificaciones.

A través de los sistemas antes mencionados se produce un flujo de aire estable que circula por las pilas de madera con T° y HR controladas; dichas condiciones son seleccionadas a través de **programas de secado (PS)** preestablecidos según especie y dimensiones (principalmente espesor) de la madera a secar. El objetivo del programa de secado es establecer condiciones y metas de HEH que conlleven a un secado progresivo con gradientes de humedad y de secado moderados, ajustados a las características del material. De este modo, se establece la condición final deseada sin tensiones y/o daños ocasionados por la pérdida brusca de agua, permitiendo un mínimo porcentaje de pérdida de madera (JUNAC, 1989); la

evolución de un PS es recogida en un controlador mediante el empleo de un software específico (Figura 5.12).

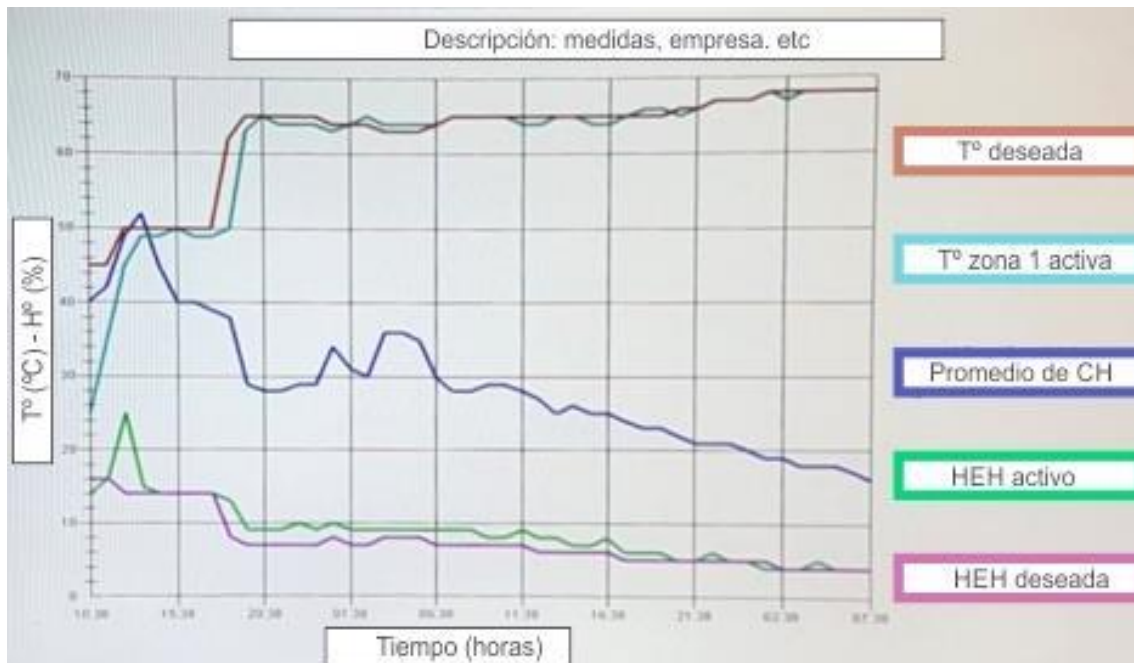


Figura 5.12. Programa de secado.
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2018).

De todas maneras, dependiendo de la especie maderera y del producto final deseado, en ocasiones se realiza un proceso de pre-secado y una etapa posterior de secado en horno. Mediante el pre-secado, se reduce el CH desde el estado verde hasta el 20-30%, permitiendo la liberación del agua libre de la madera. Esta etapa puede realizarse a la intemperie, tal como fue indicado anteriormente. También se puede realizar en pre-secaderos climatizados a bajas temperaturas y con ventilación, siendo la calidad del proceso superior a medida que aumenta el resguardo del material y las condiciones del proceso (JUNAC, 1989).

Proceso de secado técnico en cámara

El proceso de secado técnico puede dividirse en 9 etapas de las cuales 8 son obligatorias y una puede ser eventual. Cada etapa y condiciones se resumen en la Tabla 5.2.

Etapa	HR	T°	Δ psicrométrica	CH madera al inicio de la etapa
1	Saturación al 100%	En aumento desde la T° ambiente	Baja, tendiendo a 0°C (aumenta T°bs* y T°bh*)	CH de ingreso a la cámara (encima PSF*)
2	Saturación al 100%	Inicial PS*	Baja, tendiendo a 0°C (aumenta T°bs y T°bh)	CH de ingreso a la cámara (encima PSF)
3	En descenso (según PS)	Por encima de la inicial y constante (según PS)	En aumento (reducción T°bh)	Estado verde (encima PSF)
4	Constante (según PS)	En aumento (según PS)	Media (aumento constante T°bs y T°bh)	En el PSF
5	Baja (según PS)	T° máxima del PS y constante	Alta (aumento T°bs y reducción T°bh)	Debajo del PSF
6	Alta-cercana a la saturación	Alta-similar etapa 5 (según PS)	En disminución (disminuyen ambos bulbos, en mayor medida la T°bs)	CH en madera más seca ≤ 2%
7	Alta-cercana a la saturación	En disminución	Baja, tendiendo a 0°C (reducción T°bs)	HEH=CH final deseado
8	En disminución (compatible con la HR% exterior)	En disminución (compatible con la T° exterior)	En disminución (compatible con T° y HR% exterior)	CH final deseado
9	Alta (saturado con vapor 80-100°C)	Valor medio del PS	Baja, tendiendo a 0°C (aumentan T°bs y en mayor medida T°bh)	CH entre 18-14%

*T°bs: temperatura del bulbo seco; T°bh: Temperatura del bulbo húmedo; PSF: punto de saturación de las fibras; PS: programa de secado.

Tabla 5.2. Etapas y condiciones generales del proceso de secado.

Fuente: adaptada de JUNAC (1989).

La **etapa 1** consiste en el **calentamiento del horno**, comienza al iniciar el proceso (encendido de la cámara) y tiene la función de igualar la T° de la cámara y sus elementos; finaliza cuando se llega a la T° inicial del PS. Se mantiene el ambiente en saturación.

La **etapa 2** (preparatoria) consiste en el **calentamiento al interior (corazón) de la madera**, comienza con la T° inicial del PS y tiene como función aumentar la T° interna de la madera; su finalización depende de su espesor y densidad. Se mantiene el ambiente en saturación.

La **etapa 3** consiste en el **secado efectivo por encima del PSF**; comienza al finalizar la etapa preparatoria y finaliza cuando las fibras exteriores de la madera alcanzan un CH cercano al PSF, cuyo valor teórico es 30%.

La **etapa 4** consiste en el **secado efectivo en la zona del PSF** (o calentamiento intermedio); comienza al finalizar la etapa anterior y finaliza cuando se logra un CH < 30% en el sensor más húmedo de la carga de madera.

La **etapa 5** consiste en el **secado efectivo por debajo del PSF**; comienza al finalizar la etapa anterior y finaliza cuando se logra un CH inferior al 2% del valor final deseado.

La **etapa 6** consiste en la **igualación** y tiene como función homogeneizar la humedad de la carga; comienza cuando el CH del sensor más seco se iguala con el deseado en la madera, y finaliza cuando el CH en el sensor más húmedo se iguala con el deseado en la madera.

La **etapa 7** consiste en el **acondicionamiento** y tiene como función disminuir y/o liberar tensiones de secado y disminuir el GH; comienza al finalizar la etapa anterior y su finalización depende de la especie y las tensiones y/o defectos generados en el proceso. El mismo se realiza con ambiente en saturación.

La **etapa 8** consiste en el **enfriamiento** y tiene como función disminuir la T° de la cámara; comienza al término de la etapa anterior y finaliza cuando la T° de la madera es compatible con la del ambiente. Cabe aclarar que la Δ psicrométrica (diferencia entre T°_{bs} y T°_{bh}) indica una HR alta, cuando su valor es pequeño (poca evaporación), y una HR baja, cuando su valor es alto (mayor evaporación y, por lo tanto, mayor enfriamiento).

La **etapa 9** consiste en el **re-acondicionamiento** de la madera cuya función es la corrección del colapso, las tensiones y/o el restablecimiento del GH. Es una etapa eventual debido a que no en todas las especies ni en todas las ocasiones, se dan estas consideraciones.

El método de control empleado en la etapa 7 de acondicionamiento, es llevado a cabo mediante higrómetros y a través del uso de diferentes probetas.

Los **higrómetros** son equipos que permiten controlar la humedad en las pilas de madera y están constituidos por 4 a 6 sensores inalámbricos distribuidos entre las mismas. Son equipos, no destructivos o pseudo-no destructivos, de determinación indirecta del CH.

Las **probetas** empleadas son:

Probetas testigos de contenido de humedad: al igual que los higrómetros, cumplen la función de verificar, con mayor exactitud, el CH durante el proceso y generalmente, se emplean para especies valiosas. Las mismas son obtenidas de material representativo de la carga (4 a 6 tablas), tal como se indica en la Figura 5.13.

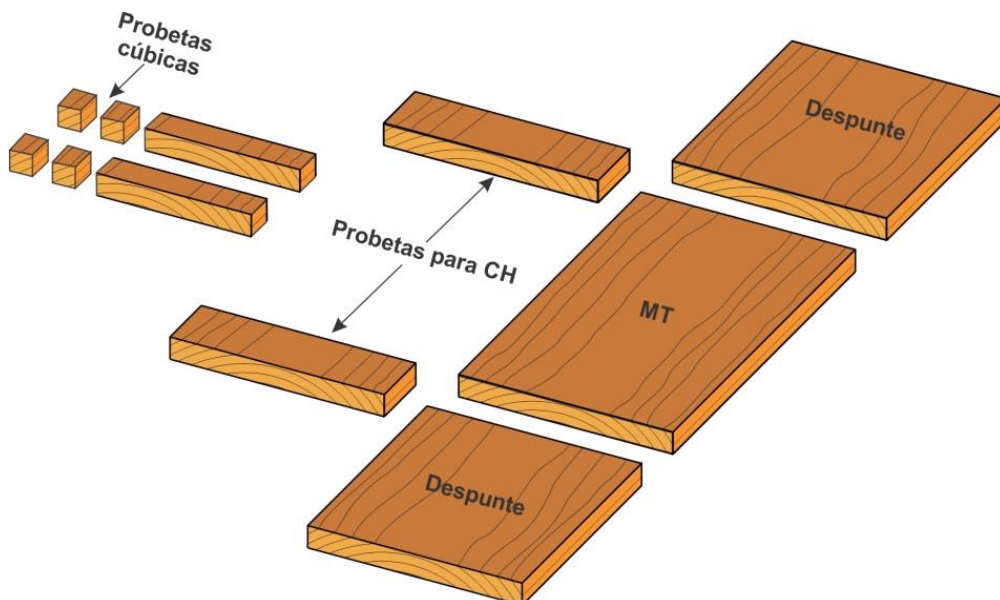


Figura 5.13. Probetas de contenido de humedad.
Fuente: adaptada de JUNAC (1989).

Seleccionado el material del cual se obtendrán las probetas, en primer término se eliminan aproximadamente 50 cm de ambos extremos (despuntos) por tener menor humedad que el centro de la tabla, y por lo tanto, ser menos representativos de la humedad de la pieza. Luego se obtiene una muestra testigo (MT), que es con la que se chequeará el CH durante todo el proceso. De la muestra testigo, se obtienen dos probetas para CH, de las cuales a su vez, se obtienen probetas cúbicas de 20 mm de lado (IRAM 9532, 1963) que son las que se pesan (Ph, en g) y posteriormente se colocan en estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante (Po, en g). Con ambos datos de las probetas cúbicas, se determina el CH según Fórmula 5.1; la muestra testigo es pesada para la obtención de su peso húmedo (PhMT, en g) y se toma como premisa que el CH determinado en las probetas cúbicas mediante la Fórmula 5.1, es el CH de la muestra testigo (CHMT, en %). Por lo cual, con dicho CH y el PhMT, se obtiene el Po de la muestra testigo (PoMT, en g), empleando la Fórmula 5.2.

$$\text{PoMT (g)} = \frac{\text{PhMT}}{100 + \text{CHMT}} \times 100 \quad (5.2)$$

Este peso anhidro no variará, por lo cual, servirá como dato de control durante todo el proceso de secado.

Las muestras testigos se distribuyen, en números variables, en distintas partes de las pilas dentro del horno, y se van retirando periódicamente y pesando, acorde a los tiempos de control que sean estipulados; con ese peso (PhMT) y el PoMT calculado en forma teórica, se va calculando el CH de la carga de madera en el horno utilizando la Fórmula 5.1. Se opera de esta manera hasta que el CHMT más húmeda, sea 2% menor que el CH deseado.

Probetas estratificadas: con estas probetas se busca conocer la distribución de la humedad en el interior de la madera. Para ello, al inicio del proceso de secado se introduce una muestra de madera representativa de la carga a secar, que se reprocesa al finalizar el secado como se indica en la Figura 5.14. Posteriormente, se pesan (peso inicial) separadamente las partes externas (a), intermedias (b) e internas (c) obtenidas de la muestra y se colocan en estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar su peso constante (peso final, anhidro). Con ambos datos, se determina el CH de las tres partes (Fórmula 5.1) y se determina la diferencia entre la zona (a) y la zona (c), la cual no debe ser superior al 2% de CH.

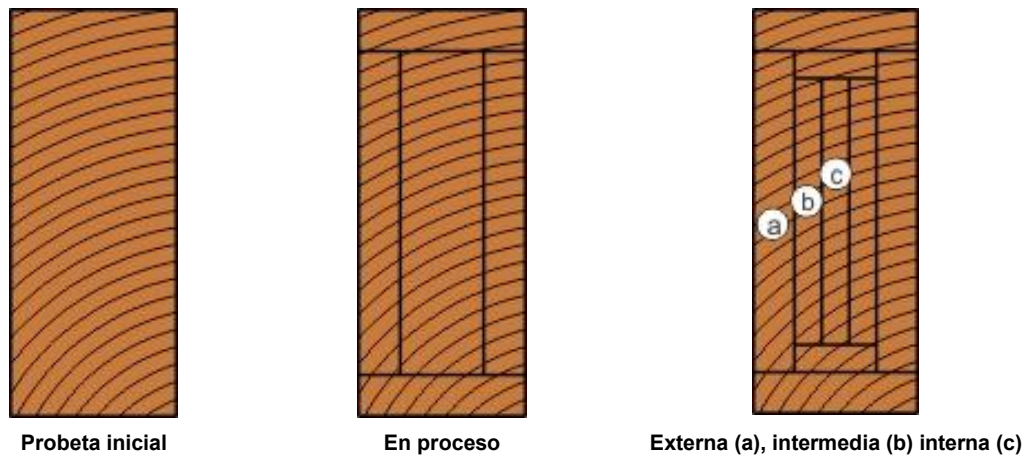


Figura 5.14. Probeta estratificada.
Fuente: adaptada de JUNAC (1989).

Probetas tenedor: sirven para comprobar el comportamiento de la madera frente a diversas tensiones de secado. La misma se elabora aserrando una pieza de madera tal como se indica en la Figura 5.15, eliminando la sección 2 y 5 indicada. Luego del proceso de secado se evalúa su comportamiento atendiendo a las siguientes especificaciones: tabla libre de tensiones (a); secado parcial en las partes exteriores (b); tensiones fuertes (c); acondicionado excesivo (d).

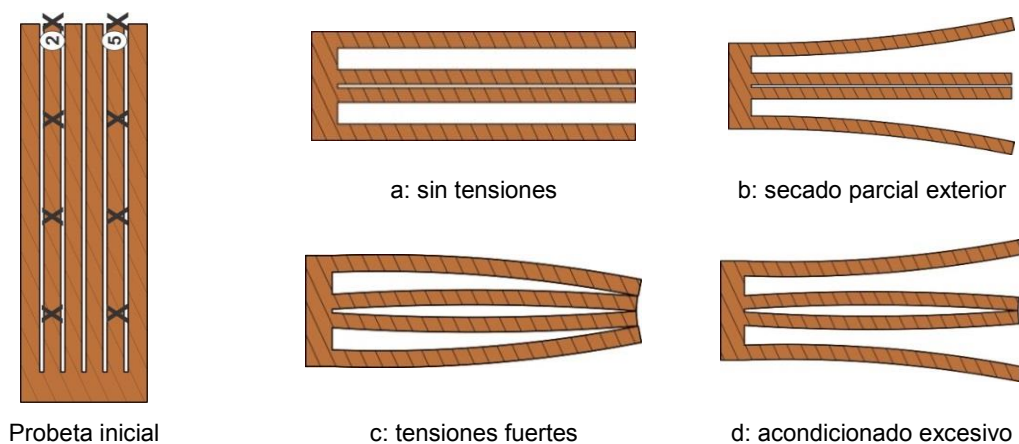


Figura 5.15. Probeta tenedor: comportamiento durante el proceso de secado.
Fuente: adaptada de JUNAC (1989).

De todos modos, el método de utilización de probetas más empleado es el TRADA (*Timber Research and Development Association*). Éste consiste en la utilización de probetas en forma de U (probeta con “dos dientes”) con dimensiones preestablecidas de acuerdo a lo indicado en la Figura 5.16. Una vez obtenida la probeta y expuesta al proceso de secado, la misma se coloca sobre una hoja A4 que tiene esquematizada tres desviaciones (1: ligero; 2: moderado y 3: fuerte) y se determina la clasificación realizando la lectura en la parte exterior del diente izquierdo, repitiendo posteriormente el procedimiento con el diente derecho (Figura 5.16). El resultado final se obtiene como promedio de las dos determinaciones.

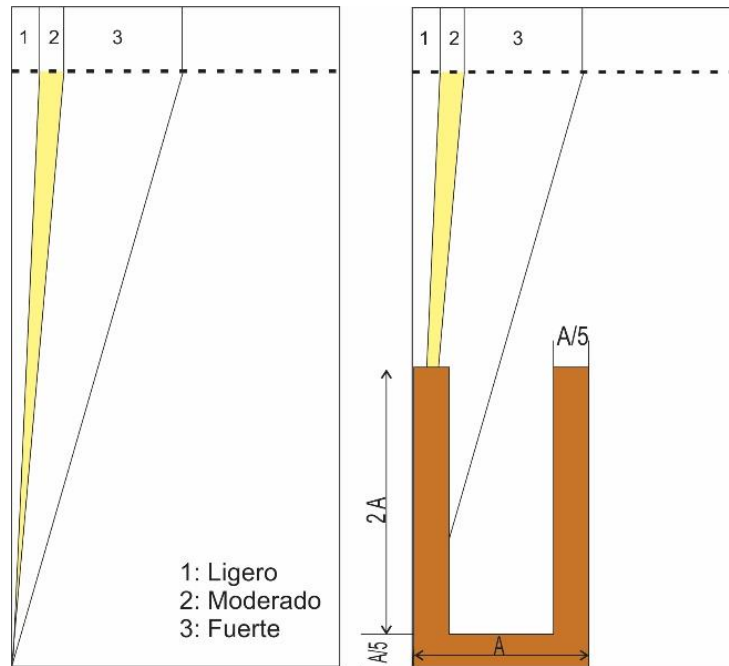


Figura 5.16. Método TRADA.
Fuente: adaptada de Atencia (s.f.)

Para finalizar la temática de secado, en la Tabla 5.3 se resumen las principales ventajas y desventajas de los dos procesos antes desarrollados.

Secado natural		Secado técnico en cámara	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Reducido monto de inversión	Tiempos de secado prolongados (4-10 meses para tablas de 25 mm de espesor) ¹⁷ .	Tiempos de secado reducidos (10-30 días) ¹⁸ .	Elevado monto de inversión inicial y costo de producción
Escasos gastos de mantenimiento y funcionamiento	Capital inmovilizado por períodos prolongados.	Capital inmovilizado por períodos breves.	Mayores gastos de mantenimiento y funcionamiento
No requiere personal capacitado	Permite secar la madera hasta el HEH del ambiente de estibado.	Permite secar la madera al CH final deseado	Requiere personal capacitado
	No permite corregir defectos que puedan aparecer durante el secado ¹⁹ .	Permite corregir defectos de secado ²⁰	

Tabla 5.3. Ventajas y desventajas de los procesos de secado.

¹⁷ La duración del proceso depende de la zona y época del año, como así también de la especie maderera.

¹⁸ Depende de la especie y el espesor.

¹⁹ Se refiere básicamente a corrección de colapso por vaporización; la corrección por cepillado es posible.

²⁰ Se refiere principalmente a defectos de colapso reversible.

Evaluación visual de la madera

Esta etapa se puede dividir en dos partes principales:

- reconocimiento, inspección y medición de las anomalías en la madera.
- clasificación no destructiva: visual resistente y otros métodos.

Reconocimiento, inspección y medición de las anomalías en la madera

Se conoce por **anomalías**, a cualquier irregularidad o imperfección de la madera, que afecte sus propiedades físico-mecánicas, químicas y/o estéticas, determinando una limitación a su uso o aplicación. Dichas anomalías pueden deberse a la **constitución anatómica** de la especie (ej. nudos), a la presencia de **ataques biológicos** (ej. mancha azul), al proceso de **secado** (ej. alabeos) o bien al **procesamiento de la madera** (ej. cepillado desgarrado), dando lugar a los diferentes tipos de anomalías que se resumen en la Tabla 5.4.

Anomalías		
Defectos (D)		Alteraciones (A)
Afectan propiedades físico-mecánicas		Afectan las propiedades químicas, pudiendo o no, afectar las propiedades físico-mecánicas
De estructura (E)	De forma (F)	
No afecta la forma de la pieza	Afectan la forma de la pieza	

Tabla 5.4. Tipos de anomalías.
Fuente: propia (2008).

Conocidas e identificadas dichas anomalías se procede a su medición siguiendo las normativas de clasificación visual específicas, las cuales establecen las formas de determinación y los límites establecidos para que dichos defectos puedan ser aceptados en las piezas de madera, sin perjudicar su condición de uso estructural.

A continuación se detallan las anomalías de mayor frecuencia y consideración en las normas. Entre paréntesis se indica si se corresponden a defectos de forma (DF), de estructura (DE) o alteraciones (A).

- **Nudosidad-Nudos (DE)**: área de tejido leñoso resultante de rastros dejados por el desarrollo de una rama, cuyos caracteres organolépticos y propiedades son diferentes a la madera circundante. En general, tienen un efecto más importante en tensión (tracción) que en compresión, por lo que, en una viga solicitada a flexión, el efecto depende de la posición en que se encuentre (zona superior comprimida o zona inferior tensionada-traccionada). Asimismo, en zonas comprimidas tienen un efecto similar en cualquiera de las posiciones que se encuentre, mientras que en zonas traccionadas, los nudos en el canto causan una excentricidad que inducen o generan

tensiones de estrés, siendo más restrictivos. Los nudos en la capa neutra (zona central) tienen poco o ningún efecto en la sollicitación a flexión. Por su parte, tienen más influencia en la resistencia (MOR: módulo de rotura) que en la rigidez (MOE: módulo de elasticidad) de la pieza. En la resistencia, su efecto depende, además de su localización, de la proporción que afecta en la pieza y de la distribución del estrés en la misma. Por lo cual, los límites establecidos por las normas para los nudos suelen estar en relación a la proporción del ancho de la cara que afectan (nudos de cara, A) o del canto (nudos de canto, B) (Kretschmann Cap. 5, 6, 2010; Wiedenhoeff, 2010). Si son nudos de cara o de canto, se tiene en cuenta la proporción que afectan de dichas superficies (Figura 5.17); si son de arista, o sea, están ubicados en dos superficies contiguas, se considera a la superficie más afectada (la que lo corta más perpendicularmente) y posteriormente, se determina la proporción como en el caso anterior; si son nudos agrupados y se encuentran solapados, se mide en la dirección transversal como un área única; cuando son agrupados pero no se encuentran solapados, se mide y suma el diámetro de cada nudo. Cabe aclarar que un nudo es considerado agrupado cuando la distancia entre centros, medida en dirección longitudinal al eje de la pieza, es menor que el ancho de la pieza o, inferior a 150 mm, si el ancho de la pieza sobrepasa los 150 mm (Fernández Golfín Seco *et al.*, 2003).

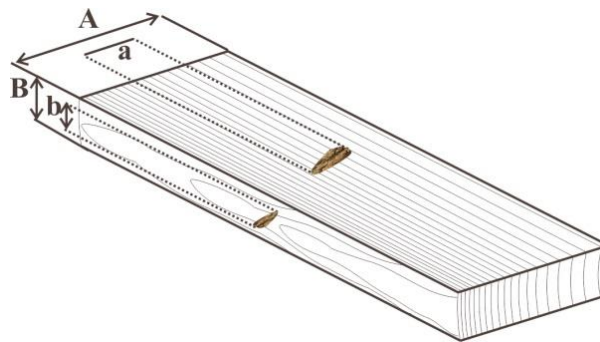


Figura 5.17. Nudos de cara y canto.
Fuente: Spavento (2015).

- **Fisuras pasantes (rajaduras)-fisuras no pasantes (grietas) (DE):** separación de los elementos constitutivos de la madera, cuyo desarrollo puede afectar o no, dos caras de una pieza aserrada y/o escuadrada. Cuando la fisura es pasante se denomina rajadura y cuando la fisura no es pasante se denomina grieta. Algunas normas no las diferencian entre pasantes y no pasantes y las mencionan como un único defecto denominado fendas (Kretschmann Cap. 7, 2010). Se registra su longitud (L) en el sentido paralelo al eje de la pieza (Figura 5.18).

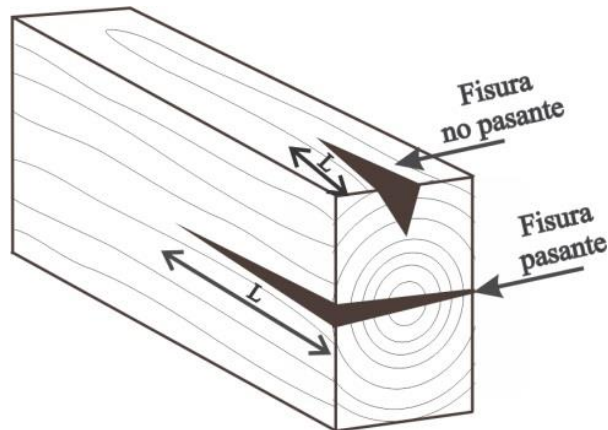


Figura 5.18. Tipos de fisuras.
Fuente: propia (2021).

- **Dirección (o desviación) de fibra-Inclinación del grano (DE):** desviación angular de las fibras con respecto al eje longitudinal o al centro de la pieza. En términos generales, grandes desviaciones de fibras son indeseables porque la madera tiende a deformarse con cambios en el contenido de humedad, siguiendo el patrón de la fibra; el estrés causado por los cambios dimensionales durante el secado de la madera, es mayor en piezas de mayor tamaño y con grano inclinado; la inclinación de las fibras causada por la presencia de un nudo, es considerado como parte del mismo (Kretschmann Cap. 5, 7, 2010). En general, esta singularidad (x) es medida en relación al eje longitudinal de la pieza (y), y se calcula como el cociente entre ambos (x/y) (Figura 5.19).

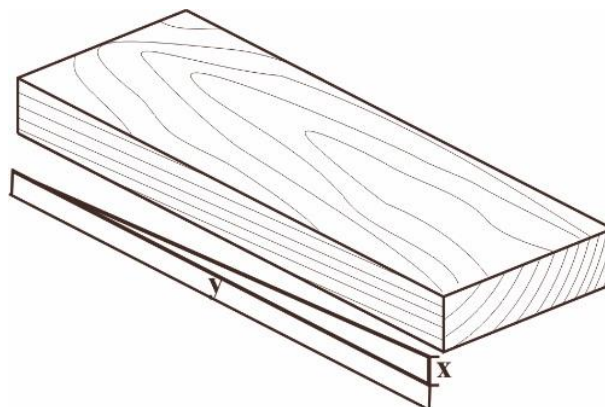


Figura 5.19. Desviación de las fibras.
Fuente: Spavento (2015).

- **Madera de reacción (DE):** en varios aspectos, es similar a la madera juvenil que se detallará más adelante, pero se forma en el árbol por diferentes motivos. Cualquier árbol, de cualquier edad, puede formar madera de reacción cuando una rama o tronco es desviada desde la dirección vertical 1 o 2 grados; por lo que todas las ramas no verticales forman considerable cantidad de esta madera, la cual difiere anatómicamente entre coníferas y latifoliadas. En coníferas, se forma en la parte inferior del tronco o rama gruesa inclinada y es denominada madera de compresión. Se caracteriza por presentar fuerte excentricidad, anillos de crecimiento anormalmente

anchos, densidades anormalmente elevadas, traqueidas cortas, células deformes con gran ángulo microfibrilar en la capa S2, alto grado de contracción longitudinal y alto contenido de lignina (Kretschmann Cap. 5, 2010; Timmel, 1986 tomado de Wiedenhoef, 2010). Su principal inconveniente radica en que dicha contracción longitudinal es anormal y excesiva, pudiendo causar fuertes deformaciones de cara o canto en las piezas. En latifoliadas, este tipo de madera se forma en la parte superior del tronco o rama gruesa inclinada y se denomina madera de tracción (Desch & Dinwoodie, 1996; Bowyer *et al.*, 2003 tomados de Wiedenhoef, 2010); las fibras fallan para formar una pared secundaria apropiada y en su lugar forman una capa de pared altamente celulósica llamada capa G o capa gelatinosa (Wiedenhoef, 2010). En ambos casos, se determina como proporción del ancho de la cara o canto que involucra.

- **Arista faltante-gema (DE)**: superficie redondeada que se manifiesta sobre las aristas de la pieza de madera aserrada; ésta mantiene la curvatura original de la troza con presencia o ausencia de corteza. Generalmente, su efecto suele ser pequeño y tan sólo puede ocasionar dificultades a nivel constructivo porque la sección de la pieza no resulta perfectamente rectangular, o bien, porque falta una parte de la pieza (Kretschmann Cap. 7, 2010; Esteban Herrero, 2003). Se determina como la proporción del ancho (h_1/h), espesor (b_1/b) o longitud (l/L) que afecta en la pieza de madera aserrada (Figura 5.20).

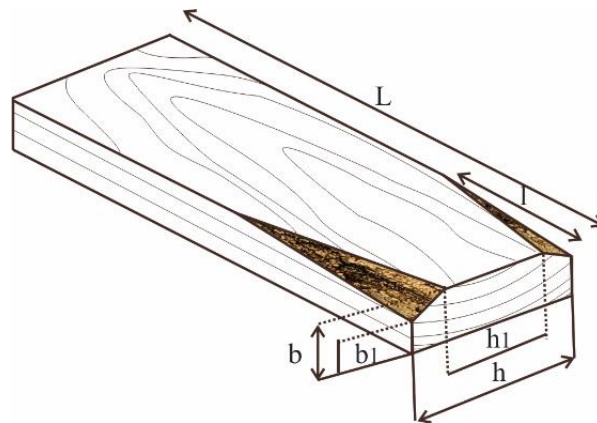


Figura 5.20. Arista faltante-gema.
Fuente: Spavento (2015).

- **Médula (DE)**: es la zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento o zona central de la pieza de madera, constituida fundamentalmente por tejido blando, cuya estructura anatómica difiere del resto de la madera. En términos generales, el problema de su presencia no radica en la influencia en la resistencia global de la pieza, sino más bien, en que la madera de su proximidad puede ser madera juvenil. Por este motivo, en algunas normas se considera cuando se clasifica y comercializa en verde (Fernández Golfín Seco *et al.*, 2003). Se registra su presencia o ausencia (Figura 5.21).

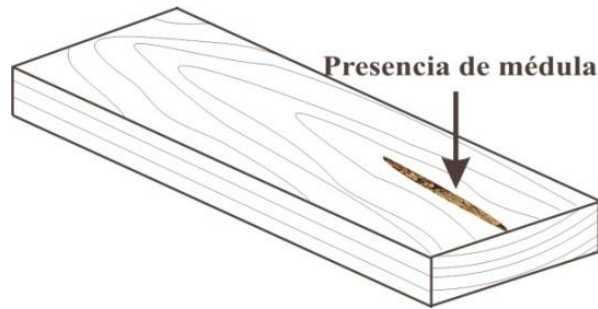


Figura 5.21. Médula.
Fuente: Spavento (2015).

- **Acebolladura (DE)**: separación total o parcial del leño entre dos anillos consecutivos. En general, se determina su presencia o ausencia, aunque puede también determinarse como proporción de la pieza afectada (Figura 5.22).

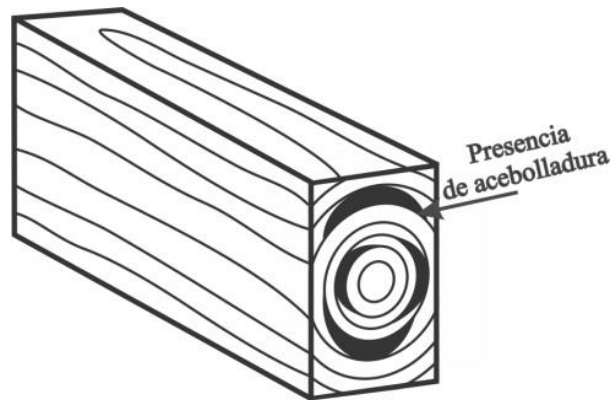


Figura 5.22. Acebolladura.
Fuente: propia (2021).

- **Corteza incluida-entrecasco (DE)**: hace referencia a la corteza incluida dentro de la pieza de madera. En términos generales, suelen tener poco efecto en la clasificación resistente si son pequeñas o aparecen en número reducido. Sin embargo, la presencia de grandes cantidades puede ocasionar zonas de debilidad entre los anillos de crecimiento (Kretschmann Cap. 7, 2010). En general, se reporta su presencia o ausencia pero también puede determinarse el número de entrecascos por longitud de la pieza (Figura 5.23).

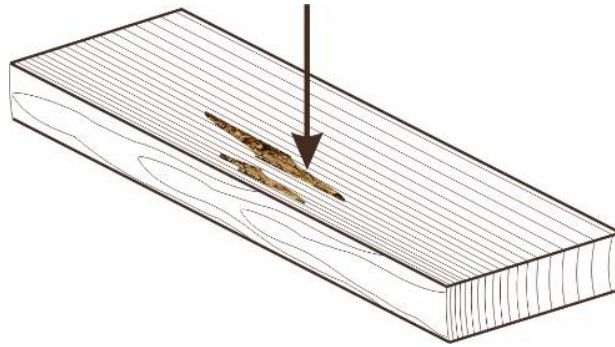


Figura 5.23. Corteza incluida.
Fuente: Spavento (2015).

- **Ancho de anillos de crecimiento (DE)**: esta característica tiene relación con la presencia de madera juvenil y su consecuente asociación con defectos de secado. En las normas se puede determinar de dos maneras; por un lado se puede medir la anchura promedio de una determinada cantidad de anillos cercanos a la médula; por otro lado se puede medir la cantidad de anillos cercanos a la médula presentes en una determinada anchura (L) de la cabeza de la pieza (Figura 5.24).

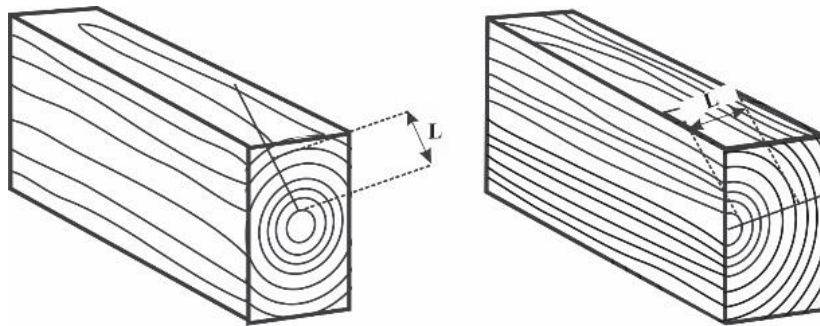


Figura 5.24. Ancho de anillos de crecimiento.
Fuente: Spavento (2015).

- **Madera juvenil (DE)**: en términos generales, es aquella formada durante los primeros estadios (anillos) de crecimiento del árbol y se encuentra cerca de la médula, con estructura y propiedades variables respecto a la madera exterior madura. En la cara transversal de la pieza pueden observarse anillos anormalmente anchos acompañados por una fuerte curvatura. Junto con la madera de reacción, suele ser la causa de deformaciones de cara y canto durante el proceso de secado; incluso, algunas normas las consideran juntas porque comparten características químicas, celulares y fisiológicas similares, aunque cada una puede o no estar presente en una pieza de madera. Presenta propiedades físicas y mecánicas considerablemente inferiores a las de la madera madura a causa de una morfología celular alterada. En este sentido, en lugar de poseer células largas y rectas, posee células cortas, desviadas (con ángulos microfibrilares hasta 10 veces superior a la madera madura), retorcidas o dobladas (Wiedenhoeft, 2010; Ilic *et al.*, 2003). En consecuencia, presenta una fuerte tendencia a sufrir

contracciones longitudinales cuando la madera es sometida a procesos de secado, o ante variaciones en el contenido de humedad, resultando en un material propenso a formación de grietas y rajaduras, y deformaciones.

- **Alabeos-deformaciones (DF):** bajo este término, se considera cualquier desviación de cara o canto de una pieza de madera con respecto a su eje longitudinal, transversal o ambos. Pueden ser producidas por diferencia de contracción entre la cara radial, tangencial y transversal durante el proceso de secado, por estrés de crecimiento (madera de reacción) o por una combinación de ambas. A su vez, éstas pueden ser agravadas por la distorsión del grano como así también por la presencia de madera juvenil. En términos generales, su determinación se realiza midiendo la desviación de la cara, canto o ambos en el sentido longitudinal o transversal de la pieza, respecto a situación ideal recta (sin desviación).

Las deformaciones más importantes en madera aserrada son (Bergman, 2010):

Curvatura de cara, combado o arqueado (*bow*): alabeo de la cara en sentido longitudinal. Se determina la deformación (*a*) sobre una longitud de 2 metros (Figura 5.25).

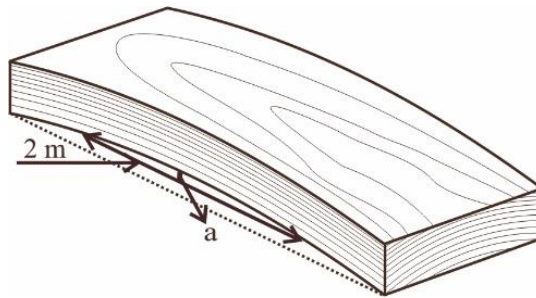


Figura 5.25. Curvatura de cara.
Fuente: Spavento (2015).

Curvatura de canto o encorvado (*crook*): alabeo de los cantos en sentido longitudinal. Se determina la deformación (*a*) sobre una longitud de 2 metros (Figura 5.26).

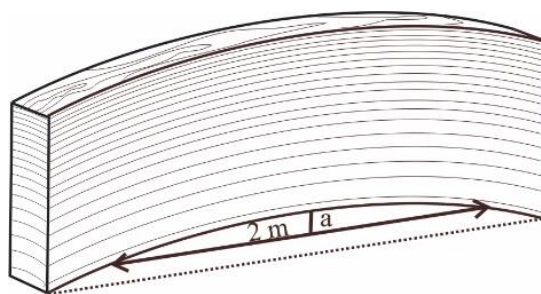


Figura 5.26. Curvatura de canto.
Fuente: Spavento (2015).

Abarquillado o atejamiento (*cup*): alabeo en la dirección transversal. Se mide como la deformación máxima (*a*) en relación al ancho de la pieza (Figura 5.27).

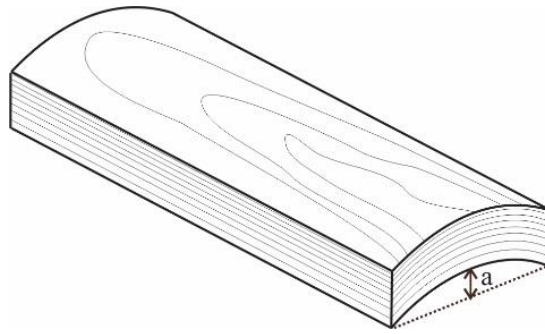


Figura 5.27. Abarquillado.
Fuente: Spavento (2015).

Revirado o alabeo (*twist*): deformación que experimenta una pieza de madera que se manifiesta por la curvatura de los ejes longitudinal o transversal, o ambos a la vez. Se determina la deformación (a) sobre una longitud de 2 metros (Figura 5.28).

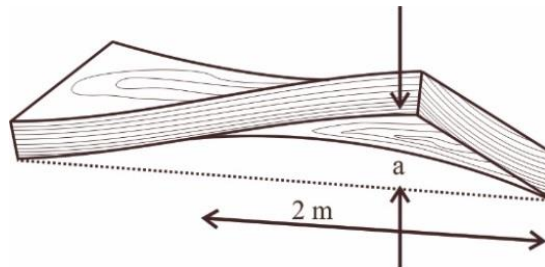


Figura 5.28. Revirado.
Fuente: Spavento (2015).

Rombo (*diamond*): escuadría irregular. Se determina la desviación (d) respecto al plano normal (Figura 5.29).

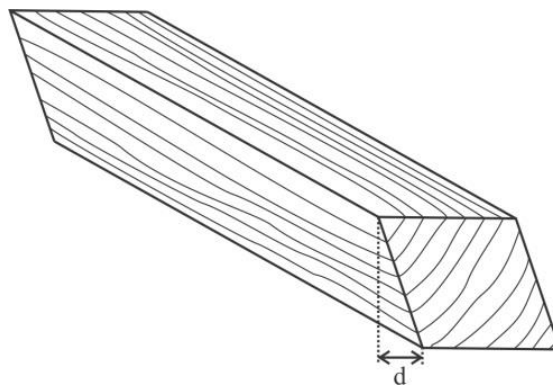


Figura 5.29. Rombo.
Fuente: propia (2020).

- **Ataques biológicos (A)**: se consideran dentro de este grupo a los defectos causados por hongos de pudrición (castaña, blanca y/o blanda), hongos cromógenos (manchas) e insectos (orificios). Algunas normas internacionales consideran dentro de esta categoría la presencia de plantas parásitas (muérdago). En todos los casos, se determina su presencia y/o tamaño-cuantía.

- **Otros:** se incluye dentro de este grupo a los daños mecánicos, los depósitos o bolsas de resina y a otros defectos que, en términos generales, no son considerados como los más importantes dentro de las normas de clasificación visual, pero que pueden determinarse por analogía con alguna característica similar.

Clasificación visual

El proceso de clasificación visual permite agrupar piezas o lotes de madera por grados de calidad visual y resistente, con la finalidad de ofrecer madera de calidad constante y acorde a las condiciones de uso estructural. De esta manera, posibilita al vendedor mejorar sus precios de venta, y al consumidor, disminuir las pérdidas de material, tiempo, mano de obra y costos. Por lo cual, es un proceso de homogeneización de calidad estructural que beneficia a ambas partes de la cadena foresto-industrial constructiva.

La clasificación visual puede considerarse una técnica de ensayo no destructivo (NDT, *Non-destructive Testing*) ya que permite examinar la madera sin que se vean afectadas sus propiedades, integridad y utilidad final. El objetivo de la misma es que a través de la observación y medición de defectos se pueda clasificar la madera en grados de calidad, que a su vez se asocien a clases o **grados resistentes** del lote. Estos grados resistentes son obtenidos a través de ensayos mecánicos destructivos; en general, a través del ensayo de flexión estática y de los parámetros de resistencia (MOR) y rigidez (MOE), junto con el valor de densidad obtenido a través del ensayo físico destructivo.

Para esta asignación resistente, el valor exigido actualmente por la normativa de cálculo es el **valor característico**, entendiendo como tal, al valor correspondiente a un fractil de la distribución estadística de una propiedad de la madera (IRAM 9664, 2013). En términos generales, es aquel que garantiza que el 95% de las piezas de un lote de madera tenga una resistencia igual o superior a dicho valor. Posteriormente, en el proceso de cálculo se introducen los coeficientes de seguridad o factores de corrección, a fin de lograr las tensiones admisibles requeridas por los reglamentos técnicos constructivos, teniendo en cuenta para ello el material y las condiciones de exposición (CIRSOC 601, 2016; Fernández Golfín Seco *et al.*, 2003).

Por su parte, una de las principales desventajas de las normas de clasificación visual radica en que están diseñadas para especies, procedencias y tamaños muy concretos, dejando normalmente fuera de clasificación a la madera de gran escuadría o a especies madereras de interés (Carballo Collar *et al.*, 2009; Íñiguez González *et al.*, 2007; Esteban Herrero, 2003; Fernández Golfín Seco *et al.*, 2003; Hermoso, 2001). De todos modos, cuando no existe una norma que regule las condiciones para una región o especie en particular, se suele aplicar una normativa con requerimientos análogos adaptable a esa especie a clasificar; en términos generales, se realiza por similitud de grupo taxonómico, ya sea conífera o latifoliada, y dentro de ellas, por similitud de características tecnológicas, por ejemplo, densidad.

Las normas de clasificación son establecidas por entes nacionales de regulación. En Argentina, se realiza a través del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Las normas de madera aserrada estructural actualmente vigentes en nuestro país son:

- **IRAM 9662 (2015):** *Madera laminada encolada estructural: clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1:* Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). Misiones; **Parte 2:** Tablas de eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*). Mesopotamia Argentina; **Parte 3:** Tablas de pino taeda y pino elliotii (*Pinus taeda* y *elliottii*). Misiones y Corrientes; **Parte 4:** Tablas de álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'). Delta del Río Paraná. Estas normas establecen un sistema de clasificación visual por resistencia de tablas aserradas destinadas a la fabricación de elementos estructurales laminados encolados, y de tablas para uso estructural flexionadas de plano aunque no formen parte de un elemento laminado encolado.

- **IRAM 9670 (2002):** *Madera estructural: clasificación y requisitos. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino elliotii y Pino taeda) del noreste argentino mediante evaluación visual.* Esta norma establece una clasificación resistente a partir de la evaluación visual de los defectos de la pieza de madera; dicha clasificación se aplica para madera aserrada de pinos resinosos destinada a elementos estructurales utilizados principalmente, bajo esfuerzos de flexión con CH de $15 \pm 3\%$, considerando escuadrías nominales comerciales, tablas y vigas. También puede emplearse para piezas que sean sometidas a otros esfuerzos, pero no para madera maciza que se emplee en la elaboración de vigas laminadas.

Como puede observarse, las normas IRAM 9662-3, IRAM 9662-4 e IRAM 9670 están establecidas para un grupo de especies. Esto es así dada la poca o nula diferenciación, de manera práctica, de estas especies en el mercado. Para el caso específico de las dos especies de *Pinus* consideradas en la norma IRAM 9662-3 e IRAM 9670, esta falta de diferenciación ha hecho que en el mercado se los conozca y comercialice bajo la denominación de pinos resinosos, siendo incluso considerado como grupo de especie en las reglas nacionales de diseño estructural (Fank *et al.*, 2017; CIRSOC 601, 2016).

Todas estas normas nacionales establecen dos clases de calidades diferentes; la primera, designada como Clase 1 (o Grado 1 en la Norma IRAM 9670), constituyendo la mejor calidad estructural, mientras que la segunda, designada como Clase 2 (o Grado 2 en la Norma IRAM 9670), constituye la peor calidad estructural. Toda la madera que no pertenezca a ninguna de estas clases es considerada como rechazo y por lo tanto, no apta para usos estructurales. Si bien cada país establece diferentes grados de calidad, a medida que éstos aumentan, el trabajo del clasificador resulta más dificultoso.

A través de las normas de clasificación visual se determinan los defectos de la madera y en consecuencia, la clase visual correspondiente, la cual además se asocia a asignaciones resistentes preestablecidas. Para la obtención de los valores resistentes indicados en estas normas, previamente fue necesario realizar ensayos destructivos que permitieron determinar los valores característicos resistentes de esas maderas-procedencias. Para ello, la normalización argentina cuenta con las siguientes normas:

- **IRAM 9663 (2013):** *Estructuras de madera: madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural: determinación de las propiedades físicas y mecánicas.* Ésta establece los métodos para el acondicionamiento del material, la determinación de diferentes propiedades mecánicas (en material con diferentes secciones y uniones) y parámetros, tales como módulo de elasticidad local (MOE_{local}), global (MOE_g) y resistencia a la flexión (MOR). Asimismo, establece las determinaciones de CH y densidad del material.

- **IRAM 9664 (2013):** *Madera estructural: determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.* La misma proporciona un método para determinar los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad en poblaciones de madera aserrada de calidades definidas. Proporciona correcciones por diferencia en contenido de humedad, la cual debe ajustarse al 12%; correcciones por dimensiones de la pieza; y establece el número de muestras a ensayar proporcionando un “castigo estadístico” en el caso que no se cumpla ese tamaño muestral.

Una vez ensayado el material atendiendo a las clases visuales previamente establecidas en las normas de clasificación visual, se asigna una clasificación resistente acorde a sus valores característicos.

En resumen, el proceso clasificatorio, teniendo en cuenta la normativa nacional podría resumirse como:

- Identificación y medición de defectos atendiendo a las normas visuales correspondientes según especies y procedencias (IRAM 9662: partes 1 a 4, 2015; 9670, 2002).
- Asignación de clases visuales (por defectos), atendiendo a las normativas correspondientes según especies y procedencias (IRAM 9662: partes 1 a 4, 2015; 9670, 2002).
- Realización de ensayos mecánicos destructivos (IRAM 9663, 2013).
- Determinación y asignación de valores característicos resistentes (IRAM 9664, 2013).

Un aspecto fundamental a destacar es que las normas de clasificación visual resistente, clasifican a las piezas individualmente, pero la asignación de resistencia corresponde al lote. Esto significa que, un lote de madera de una determinada especie y calidad que sale del aserradero, tendrá en su conjunto una determinada resistencia, la cual es establecida en la norma. Pero si en dicho lote, y con posterioridad a la clasificación resistente, se procediera a extraer piezas de madera de forma no aleatoria (por ejemplo, seleccionando las de mejor aspecto para destinarlas a carpintería o a usos más selectos), el lote restante podría no tener la resistencia característica inicial. Por dicho motivo, los aserraderos o comercializadores de madera, no deben permitir bajo ningún concepto que se realicen clasificaciones posteriores sobre la madera previamente clasificada desde el punto de vista resistente. Esto se debe a que la norma da como resistencia de cualquier combinación especie-calidad, el valor característico de la resistencia (5^{to} percentil del MOR) de todas las piezas del lote, por lo que si con posterioridad a la clasificación resistente se quitan piezas con mejor aspecto, se están quitando, en definitiva, las de mayor resistencia, motivo por el cual el valor característico del lote residual descende cuanto más piezas con estas características se extraigan. El límite inferior de resistencia del lote depende de la resistencia de

las peores piezas, o sea de las piezas con MOR por debajo del 5^{to} percentil en el lote inicial (Fernández Golfín Seco *et al.*, 2003).

Por su parte, este proceso clasificatorio debe ser considerado en los cálculos de diseño constructivo. Para ello, a nivel nacional existen los siguientes documentos reglamentarios:

- **Reglamento argentino de estructuras de madera (CIRSOC 601, 2016).** *Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones.* Este reglamento define los métodos y disposiciones generales a emplear en el diseño y construcción de estructuras para edificaciones y obras civiles con madera aserrada, madera laminada encolada y productos derivados de la madera, como así también los métodos a emplear en el diseño y fabricación de uniones simples y múltiples.

El mismo está organizado en capítulos y suplementos. En los capítulos se desarrollan los conceptos principales sobre: los requerimientos generales para el diseño estructural; los valores de diseño; las disposiciones y ecuaciones para el diseño; el diseño de miembros estructurales de madera aserrada y de madera laminada encolada estructural; de miembros estructurales de sección transversal circular; de vigas prefabricadas, madera compuesta estructural y tableros estructurales; y el diseño de uniones mecánicas y de sistemas estructurales. En los suplementos se especifican los valores de diseño de referencia para: madera aserrada clasificada por resistencia, acorde a las normativas anteriormente mencionadas (9662:1-4; 9670), y acorde a apéndices específicos definidos en algunos de los suplementos; para madera laminada encolada estructural; para miembros estructurales de sección circular; y los valores de diseño de referencia para uniones mecánicas.

Dicho reglamento considera únicamente los requisitos relacionados con el comportamiento mecánico y durabilidad de las estructuras, sin tener en cuenta aspectos tales como, aislamiento térmico y acústico, entre otros; asimismo, si bien no se excluye la utilización de otros materiales, métodos de diseño y sistemas estructurales, debe demostrarse que tendrán un desempeño satisfactorio para el uso destinado. Tampoco se incluye el diseño y la construcción de puentes, las estructuras sometidas a la acción del fuego, entre otros.

- **Manual de aplicación de los criterios de diseño adoptados por el Reglamento CIRSOC 601 (2016) (CIRSOC, 2016).** *Con ejemplos desarrollados y comentados y tablas auxiliares para el cálculo.* Tiene como objetivo facilitar la interpretación de las reglas de diseño adoptadas por el Reglamento CIRSOC 601 (2016).

El documento contempla ejemplos resueltos y comentados sobre problemáticas del diseño estructural con madera y tablas auxiliares para el cálculo estructural.

- **Guía para el proyecto de estructuras de madera con bajo compromiso estructural en base al reglamento argentino de estructuras de madera CIRSOC 601-2016 (2018) (CIRSOC, 2018).** *Primera Parte: Viviendas de madera de una planta.* Esta guía debe considerarse complementaria al manual, pero a diferencia de éste, la guía focaliza exclusivamente en construcciones con bajo compromiso estructural, particularmente en viviendas, proveyendo soluciones simples para casos relativamente estandarizados.

En primer término, la guía se refiere a la estructura de viviendas de una planta, y está organizada considerando prácticas constructivas usualmente adoptadas en nuestro país, delimitando zonas geográficas de aplicación, cargas consideradas y condición de servicio de la estructura. Las zonas geográficas de aplicación quedan eximidas de la aplicación de los requerimientos de dos tipos de peligros: sismo-resistentes y de la acción de la nieve y del hielo. Asimismo, las soluciones estructurales quedan establecidas de acuerdo al grado de urbanización y la exposición del terreno. Se clasifican en exposición A: centros de grandes ciudades donde al menos 50 % de los edificios poseen alturas por encima de 20 m, entre otras consideraciones sobre dirección del viento y distanciamiento de edificaciones; exposición B: áreas urbanas y suburbanas, arboladas u otros terrenos con numerosas obstrucciones poco espaciadas que tengan el tamaño de residencias unifamiliares o mayores, entre otras consideraciones de dirección del viento y distanciamiento de edificaciones; exposición C: terreno abierto con obstrucciones dispersas que poseen alturas generalmente menores que 10 m; incluye terreno plano abierto y praderas. La guía no contempla la exposición D: áreas costeras planas no obstruidas expuestas a viento soplando sobre aguas abiertas en una distancia de por lo menos 1600 m, entre otras consideraciones de dirección del viento, exposición y distanciamiento de edificaciones; como así tampoco, las situaciones locales de microclimas o zonas topográficas especiales.

En segundo término, la guía presenta la estructura de dos proyectos adoptados como modelos de viviendas, como así también alternativas de solución para los sistemas y componentes estructurales según dimensiones, tipologías, especies y grados estructurales.

Otros métodos de clasificación

Si bien el método NDT más tradicional y ampliamente utilizado para la predicción de las propiedades de la madera, es el de clasificación visual anteriormente desarrollado, existen otros que son factibles de utilizar para tal fin. Los mismos permiten detectar, localizar y medir defectos, determinar propiedades de los materiales, como así también determinar su composición o garantizar su adecuado comportamiento en uso. Entre ellos, los métodos acústicos son los más difundidos después de la clasificación visual. Por ello, en este capítulo se describirá un equipo de ondas sónicas, denominado *Microsecond timer*®, *Fakopp Enterprise*, el cual se encuentra disponible en el LIMAD.

El procedimiento a aplicar con este equipo consiste en generar una onda sónica, en este caso a través de un impacto de martillo, en un sensor o palpador de inicio, y en hacer pasar ese impulso a través de la pieza de madera aserrada (de longitud conocida), hacia el palpador receptor. Por lo cual, el objetivo del ensayo es la medición del tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre el punto emisor y el receptor. Esta determinación puede realizarse de manera directa, en sentido longitudinal al eje de la pieza, donde cada palpador es colocado en un extremo de la pieza (Figuras 5.30 y 5.31), o bien, de manera indirecta, cuando no se tiene acceso a los extremos de la pieza, como puede ser una viga estructural en servicio.

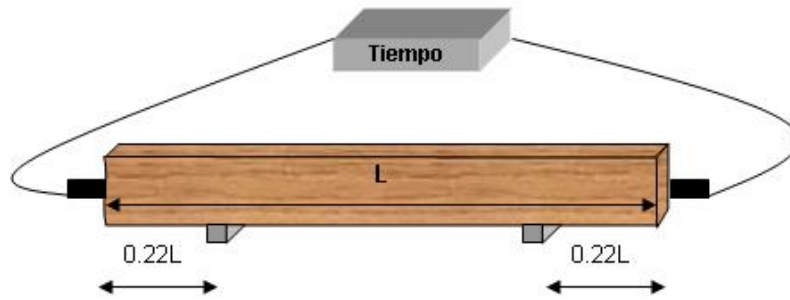


Figura 5.30. Esquema de ensayo acústico.
Fuente: propia (2014).



Figura 5.31. Determinación en laboratorio de ensayo acústico.
Fuente: propia (2014).

Conociendo esa distancia recorrida entre ambos palpadores y el tiempo empleado (indicado en la pantalla del equipo), la velocidad de la onda se determina de acuerdo con la Fórmula 5.3. Conociendo la densidad de la madera, a partir de esta velocidad, se puede determinar el módulo de elasticidad dinámico del material (MOE_d) atendiendo a la Fórmula 5.4.

$$V \text{ (m/seg)} = \frac{d}{t} \quad (5.3)$$

$$MOE_d \text{ (MPa)} = (V)^2 \times \rho \quad (5.4)$$

Siendo: V : velocidad de paso de la onda, en m/seg; d : distancia entre emisor y receptor, en m; t : tiempo transcurrido en la transmisión de la onda, en seg; MOE_d : módulo de elasticidad dinámico, en MPa; ρ : densidad de la pieza de madera, en Kg/m^3 .

El fundamento del uso de esta técnica como método clasificatorio se basa en la buena relación existente entre la velocidad de paso de la onda, o el MOE_d , y el MOE obtenido mediante ensayo destructivo en máquina universal. Por lo cual, conociendo el MOE_d de una especie maderera y su relación con el MOE obtenido en máquina universal de ensayo, es factible utilizar esta metodología para realizar una evaluación clasificatoria de dicho material. Por otro lado, la relación existente entre la V , o el MOE_d , y el MOR en máquina universal es, en términos generales, sensiblemente más baja debido a la presencia de defectos locales ya que, al no ser registrada su magnitud (y en algunos casos, su ubicación), limitan significativamente la carga máxima soportada y consecuentemente, su resistencia (MOR).

Por su parte, estos valores deben ser corregidos al CH de referencia (12%), para lo cual, la humedad del material ensayado debe ser conocida y determinada; la misma puede ser obtenida

mediante evaluación destructiva, método gravimétrico o bien, mediante metodología NDT a través de xilohigrómetros de contacto o de resistencia, detallados anteriormente.

Cabe aclarar que a través de este método acústico (*Microsecond timer*®), una discontinuidad en el material, como puede ser un nudo, aumenta el tiempo de paso de la onda desde el emisor hacía el receptor, por lo que la velocidad de paso de la onda, se ve reducida ante la presencia de un defecto, el cual podría ser considerado, para estos fines, como un “obstáculo”. Pero esta técnica no indica cuán grande es, o donde está ubicado ese “obstáculo”. Por esta razón, las técnicas acústicas en general, incluido el equipo *Microsecond timer*® aquí descrito, alcanzan una mayor precisión cuando se lo emplea conjuntamente con la clasificación visual.

Diversos métodos NDT pueden emplearse para estimar otras propiedades físicas o mecánicas. Un ejemplo de ello lo constituye el *Pilodyn*, el cual consiste en un dispositivo, penetrómetro, que permite calcular la profundidad de penetración de una varilla de 2,5 mm de diámetro en una pieza de madera. Dicha varilla es accionada por un muelle y la profundidad de penetración es registrada en una escala graduada del equipo, con un rango de lectura de 0 a 40 mm y una precisión de 1 mm (Figura 5.32). Por lo cual, tanto la densidad como la dureza de la madera puede estimarse con este equipo dada la relación existente entre dichas propiedades y la profundidad de penetración (Íñiguez González, 2007).



Figura 5.32. *Pilodyn*.
Fuente: GIS Iberica (2020)²¹.

Remanufactura

Esta etapa incluye diferentes procesos que le agregan valor a la madera aserrada. Diversos productos pueden surgir a partir de aquí, pero en este capítulo se desarrollará el procedimiento general de obtención de productos de madera encolada (Kretschmann Cap. 6, 2010; Stark *et al.*, 2010; García Esteban *et al.*, 2002) destacando oportunamente, los equipamientos disponibles y los procesos factibles de realizar en el CTM.

Para ello, se parte de la madera aserrada seca y clasificada. Cuando se fabrican productos estructurales, como vigas laminadas o paneles de madera contralaminada (CLT), dicha

²¹ <http://www.gisiberica.com/equipos%20de%20control%20de%20calidad/QC400.html>

clasificación es más rigurosa, y se realiza a través de las normativas nacionales de clasificación visual por resistencia, anteriormente mencionadas. Cuando se fabrica un producto no estructural, como machimbres, molduras, zócalos, *siding* (revestimiento exterior) o tableros de listones, dicha clasificación es visual y tiene como finalidad, evaluar la presencia de defectos a los fines de que los mismos no influyan en la adhesividad del producto empleado para realizar las uniones, en la trabajabilidad y/o a la estética del producto final.

De todas maneras, en todos los casos, la clasificación debe realizarse ya que sirve para posteriormente efectuar, de ser necesario, el saneado de la madera, a fin de quitar los defectos indeseables, permitiendo producir madera saneada o *clear*, en forma de *block* o bloques que se unirán para formar piezas de mayores dimensiones (*blank* o listón saneado); estos últimos, posteriormente constituirán un producto final con diversas características, calidades y aplicaciones.

El proceso general de remanufactura de la madera consiste en:

- **Cepillado:** mediante este proceso se quitan las irregularidades propias del aserrado de la pieza de madera y además, se logra una mejor visualización de los defectos. La máquina con la que cuenta el CTM para realizar este proceso es una cepilladora, también denominada moldurera, de 4 cabezales en los cuales se colocan las fresas según el trabajo a realizar (Figura 5.33). Estas 4 fresas permiten en una única pasada de la madera a través de ellas, cepillar las dos caras y los dos cantos de la pieza aserrada simultáneamente.



Figura 5.33. Cepilladora-CTM.
Fuente: propia (2020).

- **Saneado:** posteriormente al cepillado, se realiza el saneado de la pieza. Para ello, con la ayuda de una tiza o lápiz, se marca la superficie que debería quitarse en la que se incluya el o los defectos a eliminar (en general, son nudos). Una vez identificada la parte defectuosa se procede a su eliminación a través de una sierra circular. De esta manera, se mejora la calidad estructural o no estructural de la madera utilizada, debiendo luego, reconstruirse las piezas a través de un método de unión. En sistemas de nuevas tecnologías, este proceso es realizado de manera computarizada; la misma máquina identifica y elimina por aserrado los defectos del listón. El CTM no cuenta actualmente con esta línea de trabajo.

- **Método de unión:** a través de esta etapa se brinda la posibilidad de fabricar piezas de grandes longitudes, adecuada resistencia y seguridad, como así también permitir el uso más integral del recurso maderero ya que pueden emplearse piezas de diferentes largos; por ejemplo, pueden utilizarse piezas cortas provenientes del proceso de reaserrado de costaneros. El método más reconocido es el de unión dentada o *finger joint* y consiste en un mecanizado que se aplica a las cabezas de las piezas, aumentando la superficie específica de contacto del material (Figura 5.34). Estas uniones se realizan en máquinas rotativas de gran velocidad que intervienen en las piezas verticalmente (en la cabeza) u horizontalmente (en el canto). El CTM no cuenta actualmente con esta línea de trabajo.

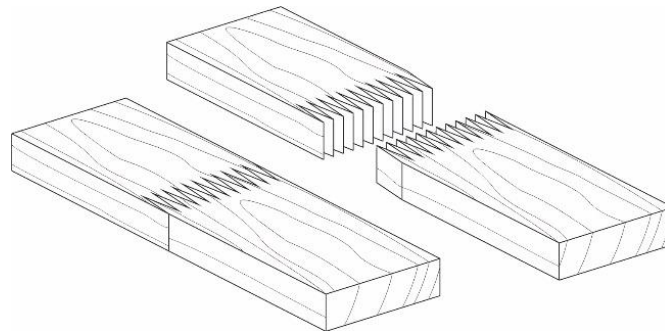


Figura 5.34. Unión *finger joint*.
Fuente: propia (2020).

- **Encolado de cabeza:** esta etapa consiste en la aplicación de adhesivo a la superficie de todos los dientes a encolar (en uniones *finger joint*), lo cual se puede corroborar cuando el adhesivo rebasa por los cuatro lados de la pieza, una vez puestos en contacto a través de presión. Para ello, atendiendo a las especificaciones técnicas, se debe tener en cuenta que la diferencia de CH entre ambas piezas a unir debe ser lo más homogénea posible (variación máxima=4-5%). Asimismo, a fin de evitar que las uniones dentadas tomen suciedad que dificulten el correcto empalme y adhesividad, el encolado debe realizarse antes de las 24 hs de realizado el dentado de la pieza. Posteriormente, se lleva a cabo el prensado de las partes con adhesivos. El mismo se realiza a través de un proceso en frío en sentido paralelo a la dirección de las fibras. El CTM no cuenta actualmente con esta línea de trabajo.

- **Cepillado:** mediante este proceso se quitan los excesos de adhesivos y/o irregularidades que se ocasionaron durante la etapa anterior.

- **Encolado de cantos o caras:** dependiendo del producto de madera encolada a realizar, cada listón saneado es encolado por sus cantos o caras. En el caso del CTM, actualmente se

pueden realizar tableros alistonados; para ello, al no contar con una línea para la producción de listones saneados, se trabaja con el listón de madera maciza aserrada, previamente clasificado; cada listón es encolado por sus cantos para conformar un tablero de hasta 1,20 m de ancho (dimensión máxima a realizar en el CTM). Dichos tableros no presentan un uso estructural, siendo empleados para fabricación de muebles (camas, mesas, entre otros).

- **Elaboración del producto final:** dependiendo del producto final se considerará: el tamaño de las láminas o listón individual a utilizar; el tipo de adhesivo a aplicar y sus especificaciones técnicas en cuanto a mezcla, tiempos de abierto y cerrado, temperatura y humedad de la madera, tiempo de fraguado, temperatura del aire, entre otros; el armado y prensado final del producto (viga laminada, CLT o tablero alistonado); el maquinado final (listones saneados para realizar *siding*, molduras, zócalos, etc) y el acondicionamiento.

- **Prensado:** mediante este proceso se logra la estabilidad del armado de las piezas. En el caso de tableros alistonados, como los que se realizan en el CTM, este proceso es llevado a cabo en frío (temperatura ambiente) en una prensa del estilo “abanico” (Figura 5.35).



Figura 5.35. Prensa tablero de listones-CTM.
Fuente: propia (2020).

- **Escuadrado:** una vez finalizado el proceso de prensado, se realiza el escuadrado del producto. En el CTM es llevado a cabo a través de una escuadradora de mesa (Figura 5.36).



Figura 5.36. Escuadradora-CTM.
Fuente: propia (2020).

- **Lijado:** a través de este proceso se eliminan las irregularidades de las láminas, o en el caso de lo especificado para el CTM, las irregularidades del tablero alistonado previamente encolado y prensado. Las mismas pueden consistir en exceso de adhesivo o irregularidades como consecuencia del desfase en el proceso de unión. En el CTM, este proceso es llevado a cabo con una lijadora de banda de una cara (Figura 5.37), la cual permite lijar una cara por pasada; para lijar la otra cara, la pieza debe girarse y volverse a pasar. La dimensión máxima de dicha lijadora es de 1,20 m de ancho, razón por la cual, el ancho máximo de los tableros que se fabrican en el CTM no puede superar dicha dimensión.



Figura 5.37. Lijadora de banda-CTM.
Fuente: propia (2020).

- **Almacenamiento y curado:** posteriormente, si el material no es inmediatamente entregado, debe ser correctamente apilado y almacenado en un lugar protegido de la intemperie y con las condiciones apropiadas de HR y T° para su posterior entrega.

Los tableros apilados se dejan en reposo por un tiempo para permitir el fraguado del adhesivo, antes de su puesta en servicio.

Si bien existen otros productos de madera encolada que se utilizan en Argentina, como se mencionó anteriormente, en este capítulo se referenció únicamente al producto más importante de madera encolada factible de realizar, actualmente, en el CTM (tablero alistonado). Cabe destacar, que a través de la correspondiente adaptación tecnológica, se podrían fabricar otros productos tales como molduras, zócalos, machimbres, marcos de aberturas, *siding*, entre otros.

Consideraciones finales

De acuerdo a lo desarrollado a través de este capítulo, para el uso apropiado de una madera aserrada con fines estructurales y no estructurales debe considerarse como punto clave de uso, su contenido de humedad y a partir de ello, aplicar un proceso de secado que se adapte a la condición de uso final. Asimismo, al ser un material biológico, su correcta aplicación estará condicionada también por la presencia de defectos que puedan limitar su capacidad resistente, para ello, existen métodos de clasificación que permiten trabajar con clases apropiadas acorde al uso. Incluso, aplicando un correcto proceso de remanufactura, puede subsanarse la limitación que producen los defectos en la madera, obteniendo, mediante un correcto proceso de clasificación y eliminación de defectos, madera *clear*, que posteriormente puede ser transformada en productos de madera maciza encolada de alto valor agregado.

Referencias

- Atencia, M. (s.f.). Secado de madera. Material didáctico. Buenos Aires, Argentina.
- Bergman, R. (2010). Drying and Control of Moisture Content and Dimensional Changes. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* (13:1-13:20). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.
- Carballo Collar, J.; Hermoso Prieto, E.; Díez Barra, R. (2009). Ensayos no destructivos sobre madera estructural. Una revisión de 30 años en España. *Kurú: Revista Forestal*, 6(17), 16 pp.
- CIRSOC 601. (2016). *Reglamento Argentino de estructuras de Madera*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- CIRSOC. (2016). *Manual de aplicación de los criterios de diseño adoptados por el reglamento CIRSOC 601*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

- CIRSOC. (2018). *Guía para el proyecto de estructuras de madera con bajo compromiso estructural en base al reglamento CIRSOC 601*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Esteban Herrero, M. (2003). *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera* (Tesis doctoral). Recuperada de Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J. (2017). Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el nordeste de Argentina. *Maderas-Cienc Tecnol*, 19(3), 247-264.
- Fernández Golfín Seco, J.; Conde García, M. (2007). *Manual Técnico de Secado de la Madera*. Madrid, España: AITIM.
- Fernández Golfín Seco, J; Díez Barra, R; Hermoso Prieto, E; Mier Pérez, R. (2003). Madera estructural: estrategias para su clasificación. Boletín de Información Técnica N°223, Madrid, España: INIA-AITIM; CIFOR-INIA
- Galván, J. (2018). Productos técnicos de madera para construcción. En FSC® España-FSC® F000228 (Coord.), *En madera, otra forma de construir-El material constructivo sostenible del siglo XXI* (127-146). Madrid, España: Forest Stewardship Council®.
- García Esteban, L.; Guindeo Casasús, A.; Peraza Oramas, C.; de Palacios de Palacios, P. (2002). *La madera y su tecnología*. Madrid, España: Ed. Mundi Prensa.
- Gottert. (2017). *Secadero. Manual técnico*. Buenos Aires, Argentina.
- Hermoso, E. (2001). *Caracterización mecánica de la madera estructural de Pinus sylvestris L.* (Tesis doctoral). Recuperada de Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Ilic, J.; Northway, R.; Pongracic, S. (2003). Juvenile wood characteristics, effects and identification: literature review. Australia: Forest and Wood Products Research and Development Corporation.
- Íñiguez González, G. (2007). *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural* (Tesis doctoral). de Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Íñiguez González, G.; Arriaga Martitegui, F.; Esteban Herrero, M.; Argüelles Álvarez, R. (2007). Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Revista Informes de la construcción*, 59(506), 97-105.
- IRAM 9532. (1963). *Método de determinación de humedad*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9662-1. (2015). *Madera laminada encolada estructural: clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (Araucaria angustifolia). Zona de cultivo de la especie considerada: Misiones*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9662-2. (2015). *Madera laminada encolada estructural: clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 2: Tablas de eucalipto grandis (Eucalyptus grandis). Zona de cultivo de*

- la especie considerada: Mesopotamia Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9662-3. (2015). *Madera laminada encolada estructural: clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino elliottii y taeda (Pinus elliottii y Pinus taeda)*. Zona de cultivo de las especies consideradas: provincia de Misiones y Corrientes. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9662-4. (2015). *Madera laminada encolada estructural: clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 4: Tablas de álamo (Populus deltoides 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67')*. Zona de cultivo de las especies consideradas: Delta del Río de La Plata. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9663. (2013). *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9664. (2013). *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9670. (2002). *Madera estructural: clasificación y requisitos. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino elliotti y Pino taeda) del noreste argentino mediante una evaluación visual*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- JUNAC. (1989). *Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas*. (1ª Ed.). Lima, Perú: Junta del Acuerdo de Cartagena.
- Kretschmann, D. (2010). Mechanical Properties of Wood. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, Capítulo N°5 (5:1-5:46). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.
- Kretschmann, D. (2010). Commercial Lumber, Round Timbers, and Ties. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* Capítulo N°6 (6:1-6:25). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.
- Kretschmann, D. (2010). Stress Grades and Design Properties for Lumber, Round timber and Ties. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* Capítulo N°7 (7:1-7:16). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.
- Spavento, E. (2015). *Caracterización y mejora tecnológica de la madera de Populus x euramericana I-214 (Dode) Guinier, austral y boreal, con fines estructurales* (Tesis doctoral). Recuperada de Universidad de Valladolid. España.
- Spavento, E.; Keil, G. (2008). Tipificación. Material didáctico. La Plata, Argentina.
- Stark, N.; Zhiyong, C.; Charles, C. (2010). Wood-Based Composite Materials. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* (11:1-11:28). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.
- Wienhoeft, A. (2010). Structure and function of wood. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* (3:1-3:18). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.