

Vigas de madera laminada

Glued laminated timber

Gabriel, Rodríguez (1)

Pertenencia institucional

(1) Universidad de la República,
Uruguay

Correspondencia

gabo160391@gmail.com

ORCID

Rodríguez
0009-0009-7665-2148

Resumen

Exposición del proceso constructivo de vigas de madera laminada desde la génesis del árbol, pasando por el proceso de aserrado y la elaboración de la viga en sí propia. Se presentan además los resultados del análisis comparativo de un ensayo de resistencia a compresión comparando una viga maciza con una de madera laminada.

Palabras clave:

Vigas; Madera; Laminada; Aserrado; Ensayos; Construcción

Abstract

An explanation of the construction process for laminated timber beams, from the tree's origin through the sawing process and the production of the beam itself. The results of a comparative analysis of a compressive strength test comparing a solid beam with a laminated timber beam are also presented.

Key words:

Laminated; Timber; Glued; GLT; Construction

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	2
I – ESTRUCTURA	
I.1 – Características microscópicas.....	4
I.2 – Características físicas.....	5
I.3 – Estructura celular.....	7
I.4 – Composición química.....	11
I.5 – Mecanismo de formación.....	13
I.6 – Variación de la estructura.....	18
I.7 – Anomalías de la madera.....	20
II – PROPIEDADES	
II.1 – Densidad.....	28
II.2 – Higroscopía.....	32
II.3 – Contracción e linchamiento.....	36
II.4 – Propiedades mecánicas.....	42
II.5 – Degradación de la madera.....	50
III – PROCESAMIENTO	
III.1 – Secado.....	60
III.2 – Preservación.....	66
III.3 – Adhesivos.....	71
IV – MADERA LAMINADA	
IV.1 – Características.....	79
IV.2 – Componentes.....	82
IV.3 – Fabricación.....	83
IV.4 – Ensayo.....	92
APÉNDICES	
AP.1 – Forestación en Uruguay.....	101
AP.2 – Productos de ingeniería.....	104
BIBLIOGRAFÍA.....	108

INTRODUCCIÓN

Desde la aparición del hombre en la tierra la madera ha contribuido a la supervivencia y desarrollo de las civilizaciones, y continua siendo materia prima para una gran cantidad de productos pese a haber una cantidad de otros materiales utilizables (metales, cementos, polímeros, etc.).

Después de que la madera es talada se transforma en diversos productos mediante procesos primarios como el cortado, encolado, laminado y mediante procesos químicos. Por los procesos primarios se obtienen maderas laminadas, tableros de partículas o de fibras (MDF, OSB), etc.; y como productos de los procesos químicos se obtienen fibras sintéticas, películas fotográficas, explosivos, químicos, entre otros.

La madera también cumple un papel muy importante como combustible. Cerca de la mitad de la producción de madera del mundo es utilizada para este fin ya que es un material renovable.

La gran cantidad de usos que posee la madera se deben a sus diversas propiedades:

1. Estéticamente es superior a otros materiales, debido a su variedad de colores, texturas y formas.
2. Sus propiedades mecánicas se destacan a pesar de su bajo peso.
3. Es un buen aislante térmico y eléctrico.
4. Posee poca contracción y expansión térmica.
5. Posee buenas propiedades acústicas (se utiliza en la fabricación de diversos instrumentos musicales).
6. No se oxida.
7. Tiene una buena resistencia al ataque de ácidos.
8. Se puede trabajar fácilmente y modificar con bajo consumo de energía.
9. Su unión mediante clavado y/o pegado es sencillo.
10. Es biodegradable.

Como todo material tiene sus desventajas:

1. Es un material higroscópico, es decir que absorbe la humedad del ambiente.

2. Es un material anisotrópico (posee distintas propiedades mecánicas en sus diferentes direcciones) como se observa en la figura 1.
3. Se puede quemar y degradar dado que es un material biológico.

Para mejorar la calidad de la madera, se realiza un tipo de forestación ordenado, ya que se siembran los árboles teniendo en cuenta la distancia entre ellos, para mejorar la llegada de aire y luz, y protegiéndolos del viento, y también de bacterias y otros microorganismos. Pero se mejora aún más mediante la selección genética de especies superiores, y seleccionando los mejores ejemplares obtenidos en cada tala dependiendo de su uso.

Uno de los mayores motivos de preocupación que tenemos con la madera a nivel científico y práctico, es el gran porcentaje de madera que se desperdicia en el proceso de producción, ya que siendo optimistas, se estima que menos de un tercio del árbol se aprovecha. Una gran parte de la madera se desperdicia al ser dejada en el bosque en la tala, y en varios procesos de manufactura. Por ejemplo cuando se convierten los troncos en láminas, se pierde entre un 30 y un 50%; en la industria del papel se pierde más de un 50% del volumen original de madera (sin contar lo que se perdió en procesos anteriores).

Otro de los grandes problemas en la sociedad moderna concerniente a la madera, es el de la polución que se provoca como consecuencia de los procesos de transformación de la misma. Esto se constata, por ejemplo, en los sitios que sirven para vertederos de los residuos químicos en las papeleras.

En el área de los desperdicios de la madera, se están realizando desde hace varias décadas, grandes esfuerzos por lograr una mayor utilización de estos recursos. Tal es el caso de la industria de los tableros de partículas, donde se utilizan los residuos tales como el aserrín. Además, otras partes del árbol (ramas, corteza, raíces y follaje) son usadas en diversos ámbitos, tales como, alimentos para animales, productos farmacéuticos y químicos, etc.

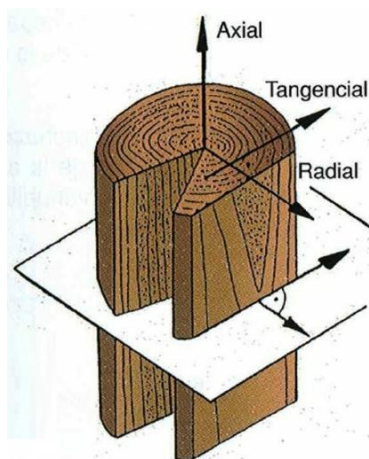


Figura 1 – Ejes de la madera

I – ESTRUCTURA

I.1 -Características macroscópicas de la madera

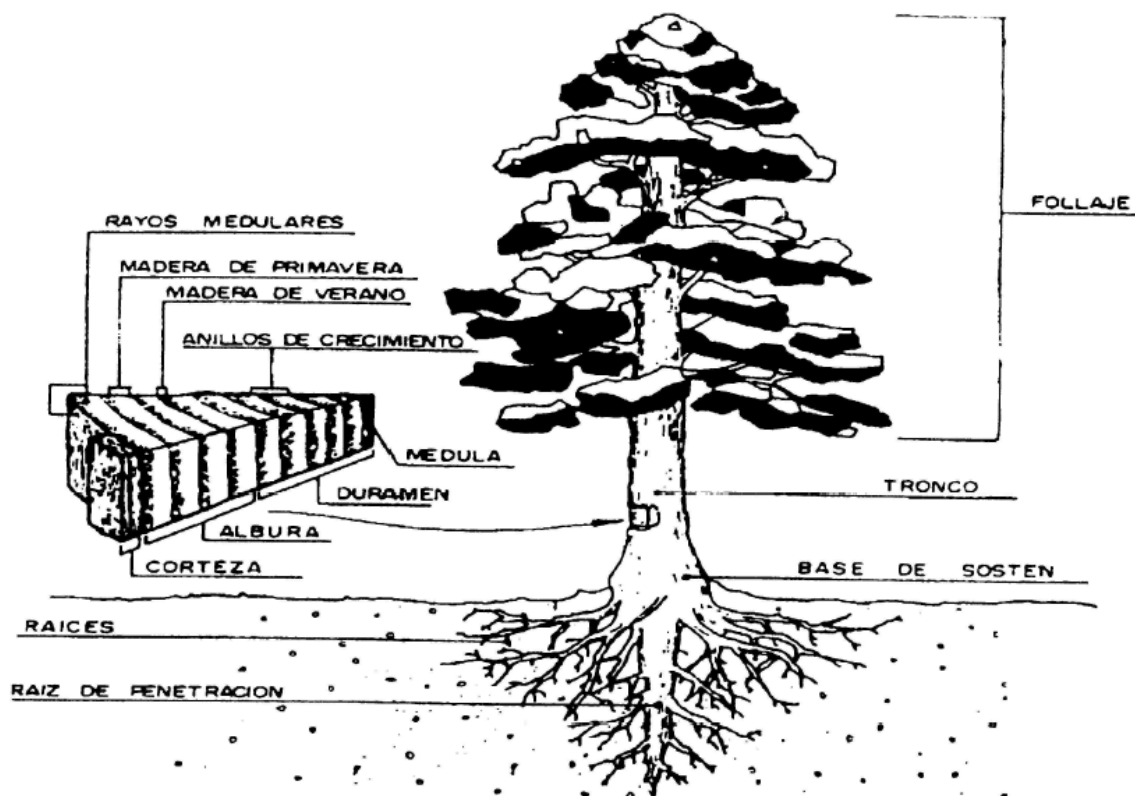


Figura 2 – Estructura del árbol vivo

Superficie transversal

La sección del corte transversal, es comúnmente de forma circular, y tiene tres partes bien diferenciadas: médula, madera y corteza. Entre la madera y la corteza, existe una capa (solamente visible a través de microscopio) llamada cambium. Ésta es responsable del crecimiento, tanto de la madera como de la corteza.

La médula, está normalmente ubicada en el centro del tronco. En las coníferas es bastante uniforme, mientras en las latifoliadas, puede variar tanto su color, estructura y forma. En el roble tiene forma de “estrella”, en la haya y en el abedul se encuentra de forma triangular, en el maple se ve de forma elipsoidal, etc.

La madera está caracterizada más que nada por la presencia característica de los llamados anillos de crecimiento. Este patrón se debe al mecanismo de crecimiento radial del árbol, que se basa en la superposición de capas. Se toma por regla, que una capa de corteza y una de madera, se forman por cada temporada de crecimiento. En especies tropicales,

los anillos no se distinguen tan fácilmente (cuando se notan, es debido a la diferencia entre la estación seca, y la estación húmeda). En la mayoría de las especies se puede distinguir los anillos de crecimiento de forma sencilla, por la madera de primavera y la de verano. Estas se diferencian en su densidad, color otras propiedades estructurales microscópicas.

En las especies coníferas la madera de primavera y de verano se diferencian en densidad y color, la de verano tiende a ser más oscura y más densa que la de primavera. En las latifoliadas las características estructurales son más útiles para diferenciarlas, por ejemplo la presencia de poros en los anillos de crecimiento, que a veces se pueden ver a simple vista.

Si diferenciamos la madera según los poros en los anillos de crecimiento, las latifoliadas se pueden clasificar en dos grandes grupos: - Los de anillos porosos como son el roble y el castaño, en los cuales los poros en la madera de primavera son significativamente más largos y están más organizados alrededor de la medula.

- Los de poros difusos como la haya y el álamo, en donde los poros son apenas uniformes en tamaño y están desordenados.

Los anillos de crecimiento son más diferenciables en las maderas de anillos porosos que en las de poros difusos. En este último caso, la distinción es posible gracias a la reducción de tamaño que tienen los poros al final de la primavera, y a las marcas que aparecen en los bordes del anillo.

El número de anillos de un corte de sección transversal próximo al suelo, se puede utilizar para determinar la edad del árbol. Sin embargo, se le debe añadir un cierto número de años para compensar el tiempo que le llevo a la planta llegar a esa altura. Esta cantidad de años agregados depende de la especie del árbol.

1.2- Características físicas de la madera



Figura 3 – Variedad de colores y texturas en la madera

Color

La madera tiene por naturaleza colores que van desde casi blanco, llegando a tonalidades muy cercanas al ébano como se aprecia en la Figura 3. Dentro del mismo tipo de madera, la diferencia de colores se da según la edad de la misma, si son capas interiores o exteriores, siendo la primera más oscura que la segunda.

El color caracteriza a las distintas especies, pero dentro de estas, la tonalidad varía dependiendo del tratamiento y los agentes atmosféricos. Cuando tiene mayor contacto con la atmosfera, la madera tiende a oscurecerse como resultado de la oxidación de distintos elementos biológicos dentro de ella.

La pigmentación es dada a la madera por compuestos que se impregnan en las paredes celulares por ejemplo taninos. También se puede ver afectado por las condiciones del crecimiento y geográficas. Se puede cambiar el color de forma artificial, ya sea por medio del blanqueamiento o el teñido.

Lustre

Algunas maderas tienen un tipo de lustre natural, a diferencia de aquellas a las que se les propina un lustrado artificial. El lustre depende del tipo de corte de la madera, siendo el corte radial el que posee mayor lustre. Entre las maderas lustrosas se encuentran la píce, el fresno, el sicómoro, etc.

Aroma

El aroma en la madera es dado por distintos tipos de extractos volátiles, sobre todo presentes en las capas interiores de la madera. Debido a la volatilidad de estos elementos, es que el olor se va perdiendo gradualmente con la exposición al ambiente. Como el color, los aromas no son fáciles de describir, pero hay algunos característicos, como lo son el del pino, el cedro, el ciprés, etc.

Textura

Las diferentes texturas de la madera son producidas por el diámetro de las células que lo componen. A mayor diámetro, crecen maderas de texturas más “gruesas”, como es en el caso de los árboles de rápido crecimiento, en cambio, cuanto menor es el diámetro de las células, crecen árboles cuya madera posee texturas más “finas”.

Una textura pareja o despareja, se define por la diferencia de crecimiento entre anillo y anillo, por ejemplo, en las coníferas, la abrupta transición entre los anillos de primavera y de verano, produce una madera de textura despareja.

Peso

El peso es una característica muy importante para clasificar y describir la madera, Sin embargo, se debe tener en cuenta que es influenciado por varios factores, como lo son la diferencia entre madera interior o exterior, y en especial la humedad. Esta última es muy importante, pues en maderas livianas, el peso de la madera con humedad, puede exceder ampliamente el peso de la madera seca.

Dureza

La dureza está íntimamente relacionada con el peso de la misma (a maderas más duras, mayor es el peso), por el contrario, el efecto de la humedad es el opuesto. La dureza también depende del sentido de corte (transversal, radial y tangencial)

I.3 - Estructura celular de la madera

La madera está formada por múltiples diminutas unidades llamadas células que conectadas entre sí conforman la masa de la madera. Mediante procesos químicos es posible disolver dichas conexiones; también por procesos mecánicos dando como resultado un gran número de células rotas. El proceso de separación es llamado maceración.

Características

Las células de las coníferas difieren de las latifoliadas. Las coníferas están principalmente formadas por largas y estrechas células tubulares llamadas traqueidas. Éstas pueden tener paredes finas o gruesas y poseer discontinuidades conocidas como poros. Entre las traqueidas se encuentran algunas células pequeñas y rectangulares llamadas parénquimas, que también poseen poros que sirven para comunicar células aledañas.

En las maderas latifoliadas, las células presentan diversas formas y tamaños. La mayoría son largas y estrechas con puntas cerradas y puntiagudas; si bien tienen cierto parecido, son considerablemente más cortas que las de las coníferas. Estas células son llamadas fibras y el ancho de sus paredes depende de la especie. También se encuentran otro tipo de células llamadas vasos, que poseen extremos abiertos y en general son más cortas que las fibras si bien se presentan de diversas formas y tamaños. Ambos tipos de células también presentan poros.

Los tipos de células nombrados anteriormente, se disponen en el árbol de diferentes formas. La mayoría de ellas (Traqueidas axiales, fibras, vasos) están ubicadas longitudinalmente, mientras las demás (Traqueidas y parénquimas radiales) se ubican en dirección radial. Dichas diferencias de disposición, le otorgan a la madera distintas imágenes según los cortes.

Cuando alcanzan la madurez, las células mueren aunque el árbol siga vivo. Como excepción, las células de crecimiento ubicadas en el cambium y las parénquimas ubicadas en la albura permanecen vivas.

Descripción de los tipos de células

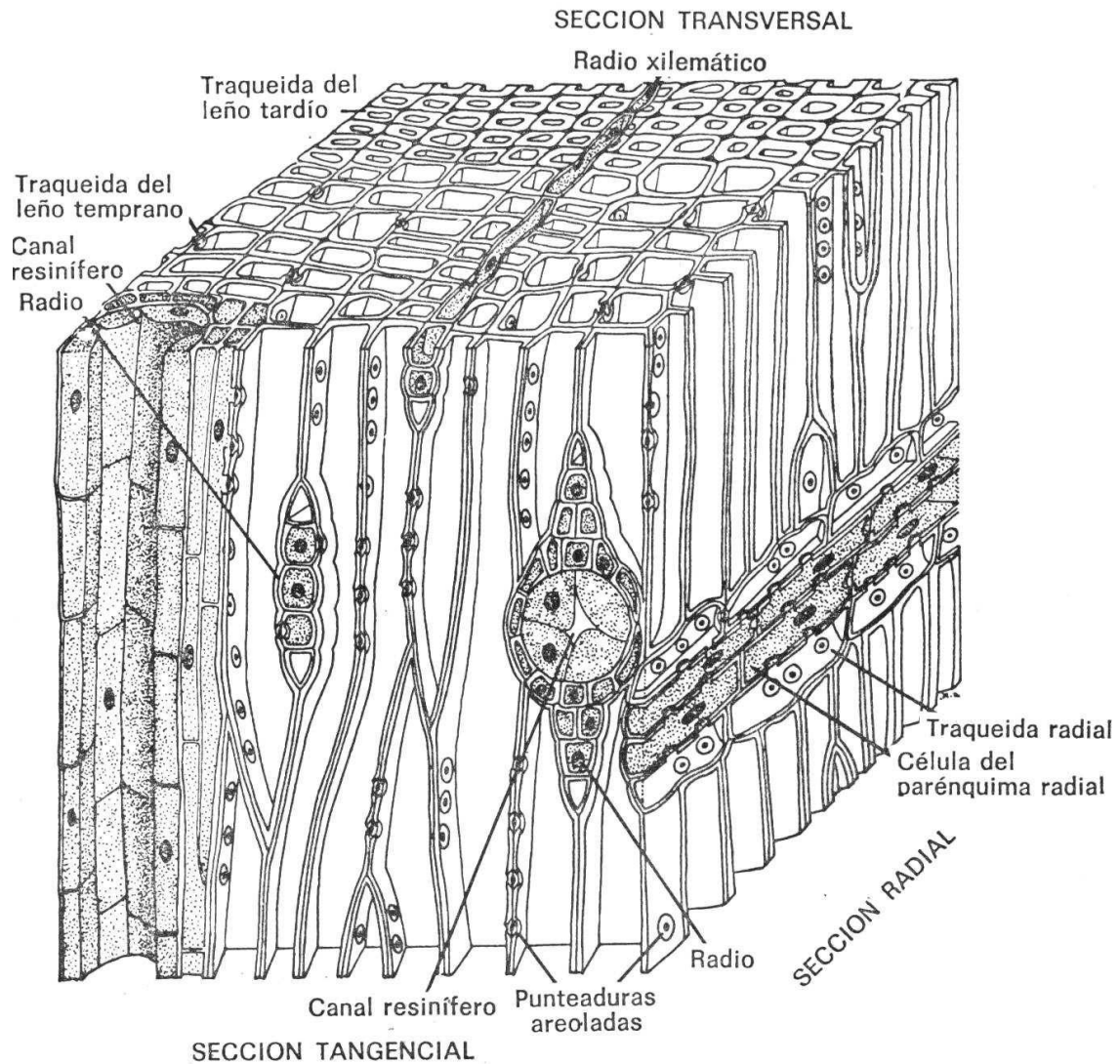


Figura 4 – Célula de coníferas

1. Traqueidas

En las coníferas (Figura 3), las traqueidas son normalmente verticales, largas y estrechas; y conforman más del 90% del volumen de la madera. Su morfología varía bastante dependiendo si es madera de primavera o de verano. En el primer caso son de paredes más finas, la sección de corte transversal tiene forma cuadrada y con poros aureolados en sus paredes celulares; por el contrario, en el segundo caso, las paredes son mucho más gruesas, de sección rectangular (alargadas en la dirección tangencial) y sus poros aureolados son mucho menos y más chicas.

Las traqueidas que no son verticales, son llamadas radios medulares. Tienen un parecido a las células, pero se diferencian en que están vacías para lograr formas irregulares, y poseen poros aureolados.

En las latifoliadas, las traqueidas no poseen características constantes, y sólo se encuentran en un pequeño grupo de esta especie, siendo considerados como elementos de transición en relación a vasos y fibras. Existen dos tipos de traqueidas en las latifoliadas: vasculares y vasicéntricas.

Las traqueidas vasculares se asemejan a pequeños vasos sin extremos perforados, por lo que a veces son llamados miembros imperfectos de los vasos. Tienen muchos poros aureolados, engrosamientos helicoidales, y se encuentran en las franjas onduladas de la madera de verano.

Las traqueidas vasicéntricas se encuentran principalmente cerca de grandes vasos en la madera de primavera de los árboles de anillo poroso. Se asemejan a las vasculares, en que ambos poseen extremos sin perforar, y en que tienen muchos poros aureolados; pero se diferencian en que comúnmente estos son más largos y de forma más irregular.

2. Vasos

Este tipo de células sólo están presentes en latifoliadas, y están conectadas longitudinalmente para formar una estructura similar a la de las cañerías, y sirve como tejido de conducción. Los extremos de las paredes de los vasos desaparecen total o parcialmente en el proceso de desarrollo, luego de haber sido formadas por el cambium. El área de las paredes laterales adyacentes que participan en la conexión longitudinalmente de dos vasos se llama placa de perforación. Las perforaciones pueden ser simples (una sola perforación, grande y circular) o múltiples (varias aberturas, alargadas, paralelas y separadas por paredes celulares llamadas escaleriformes).

3. Fibras

Su función principal es la de proveer soporte mecánico al árbol, aunque también pueden participar en la conducción. Al igual que los vasos, las fibras están presentes sólo en latifoliadas, pero éste tipo de células son largas y finas, con un parecido a las traqueidas en la madera de verano. Las fibras poseen extremos cerrados, mayoritariamente puntiagudos, sus paredes pueden ser tanto gruesas como finas. Se pueden clasificar en fibras traqueidas (tienen poros aureolados) y fibras libriformes (posee poros simples, minúsculos).

4. Parénquima

Las células parénquimas tienen forma prismática, casi como la de un ladrillo, y están llenos de materia, que puede ser células vivas como en la albura, o material inorgánico en forma cristalina. Se puede clasificar en axial o radial.

La parénquima axial no está presente en toda la madera (puede estar absolutamente ausente en las coníferas), y cuando lo está, puede estar entreverada con las células traqueidas, en cambio, en las latifoliadas, es difícil que no esté. De acuerdo a su ubicación, las parénquimas axiales pueden ser paratraqueales (están cerca de los vasos), apotraqueal (no están en contacto con vasos), o fronteriza (se encuentra en los bordes de los anillos de crecimiento). Las células de la parénquima radial pueden llegar a constituir todo el radio, y forma parte de los tejidos conductores en el árbol.

Canales intercelulares

Se pueden clasificar en axiales, que se originan por la separación de las células, dejando un espacio donde aparece el canal; y transversales, que aparecen por un proceso de disolución del tejido celular, dejando también un espacio para que aparezca el canal.

I.4 - *Composición química*

Composición química elemental de la madera

Con respecto a la composición química elemental, no hay diferencias importantes entre maderas distintas. Los principales elementos de la madera son: carbono (C), hidrógeno (H), y oxígeno (O); también en pequeñas proporciones se encuentra nitrógeno (N).

Análisis químicos de un número de especies, incluyendo coníferas y latifoliadas, muestran un porcentaje de elementos, con respecto al peso de la madera secada a horno, aproximados a los siguientes: carbono 49-50%; hidrógeno 6%; oxígeno 44-45%; y nitrógeno apenas 0,1-1%. Además de los anteriores, habitualmente pequeñas cantidades de calcio, magnesio y potasio, son encontradas en la ceniza de la madera, la cual raramente se presenta en un porcentaje mayor a 0,2% o mayor al 1% en la madera secada a horno.

Componentes orgánicos de la madera

Carbono, Hidrógeno y Oxígeno se combinan para formar los principales componentes orgánicos de la madera,

conocidos como celulosa, hemicelulosa y lignina. Las proporciones de celulosa, hemicelulosa y lignina, son, en madera secada a horno, aproximadamente: celulosa, 40-45%; lignina, 25-35% en maderas coníferas y 17-25% en maderas latifoliadas; hemicelulosa, 20%.

La celulosa está compuesta por moléculas de glucosa ($C_6H_{12}O_6$), un monosacárido formado por la fotosíntesis a partir de dióxido de carbono (CO_2) del ambiente. Las moléculas de glucosa están enlazadas unas a las otras para formar largas moléculas en cadena de celulosa. El enlace de dos moléculas de glucosa cualquiera, es acompañado por la eliminación de una molécula de agua, y cada molécula de glucosa agregada a la cadena es rotada 180° . Este proceso de repetida e indefinida adición de unidades de glucosa (monómeros) es llamada polimerización. La fórmula empírica para la celulosa es $(C_6H_{10}O_5)_n$; donde n es el grado de polimerización o número de monómeros de glucosa por cadena de celulosa.

La hemicelulosa es químicamente relacionada a la celulosa por ser ambas parte del grupo de carbohidratos. Los carbohidratos son sustancias químicas compuestas por carbono, hidrogeno y oxígeno, donde estos últimos dos se encuentran en las mismas proporciones que se presentan en el agua.

La diferencia entre la hemicelulosa y la celulosa se basa principalmente en su respectiva solubilidad en álcalis; la celulosa no es soluble en una solución de 17.5% de hidróxido de sodio (NaOH), mientras que la hemicelulosa si lo es. Las moléculas de hemicelulosa son también cadenas como en la celulosa, pero con un grado de polimerización muchísimo menor. A diferencia de la celulosa, que está compuesta solo por glucosa, la hemicelulosa incluye una variedad de monosacáridos.

La lignina es la pared celular que diferencia la madera de otros materiales de celulosa producidos por la naturaleza. La lignina es producida únicamente por células vivas. La finalización de la producción de lignina coincide con el consumo de protoplasma y la muerte celular. La lignina se genera en asociación con la celulosa mientras que la celulosa se puede encontrar prácticamente pura en la naturaleza.

Extractivos

La madera puede tener varias inclusiones (mayormente orgánicas) que son llamados extractivos. Estos no son parte de la sustancia de la madera, pero están depositados en los lúmenes y en las paredes de las células.

Los extractivos están compuestos por varias composiciones químicas como son las grasas, resinas, azúcares, aceites, almidones, alcaloides, y taninos. El nombre se basa en el hecho de que estas sustancias pueden ser extraídas de la madera con agua caliente o fría, o solventes orgánicos neutros como el alcohol, benceno, acetona o éter. La proporción de estos extractivos varía entre menos del 1% (álamo) hasta más del 10% (secoya) en madera secada a horno; en algunas especies tropicales este porcentaje puede alcanzar el 20%. Las variaciones no solo se encuentran entre distintas especies, sino que también pueden encontrarse diferencias dentro de un mismo árbol, principalmente entre la albura y el duramen.

Ciertamente los materiales inorgánicos, como el calcio, sales e inclusiones de sílice, que no son solubles en los solventes mencionados anteriormente, son a veces considerados como extractivos cuando no son parte de las paredes celulares. Bajo este concepto, todos los materiales inorgánicos (ceniza) pueden ser considerados extractivos.

1.5 – Mecanismos de formación de la madera

Los árboles crecen en 2 direcciones, en altura y diámetro. En ambos casos, el crecimiento es logrado debido a la multiplicación de células capaces de dividirse; estas células componen los tejidos generativos o meristemáticos. El crecimiento en altura, llamado primario o apical, se da gracias a la actividad de meristemos apicales o principales, en el tronco, ramas y raíces. El crecimiento en diámetro, o crecimiento secundario, se da gracias a la actividad de meristemos laterales (principalmente por el cambium). Los tejidos producidos por los meristemos apicales son llamados tejidos primarios; los tejidos producidos por los meristemos laterales son llamados secundarios.

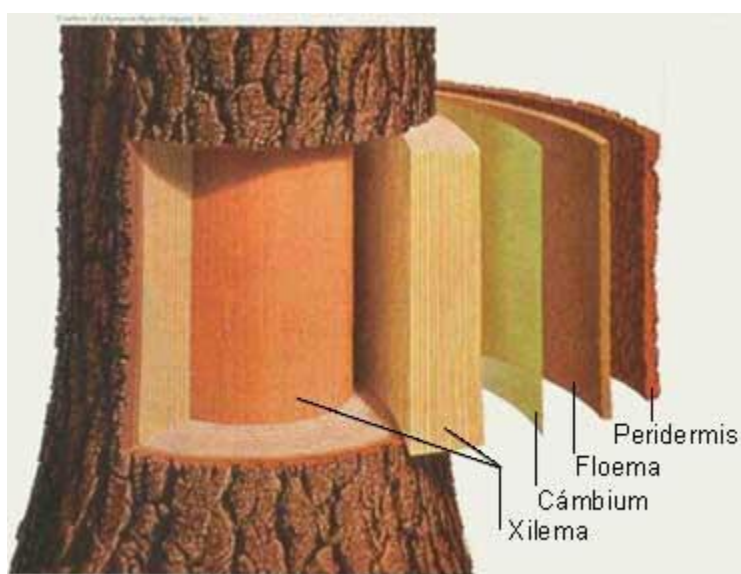


Figura 5 – Responsables de la formación de la madera

Crecimiento primario

En los árboles el crecimiento es iniciado por un grupo de células llamadas apicales iniciales. Las células derivadas de estos “iniciales” (llamadas células madre) usualmente mantienen la capacidad meristemática. El grupo formado por los apicales iniciales y las células madre es llamado protomeristemo o promeristemo.

A medida que el crecimiento continua, los tejidos más viejos son dejados atrás por el promeristemo. Gradualmente los tejidos nuevos comienzan a tener pequeñas diferencias en tamaño y forma, generando tres regiones distintas: protodermis (la capa mas externa), procambium y meristemo fundamental o básico.

La protodermis se transforma en la epidermis; esta es por lo general una capa protectora de una célula de espesor, estando las capas más externas impregnadas con sustancias a prueba de agua (cutina y cera). Además la epidermis es capaz de proteger a los tejidos anteriores de la perdida excesiva de humedad.

El procambium se diferencia en xilema primario, floema primario y cambium. Estos tejidos se expanden radialmente hasta que finalmente quedan separados por capas de una célula de espesor. El cambium se forma tempranamente durante la primera temporada de crecimiento a muy poca distancia de la copa.

El meristemo fundamental da lugar a la corteza y a la médula, así como a las raíces que comienzan en la médula.

Crecimiento secundario

El crecimiento secundario o crecimiento en diámetro, comienza con la formación de cambium. El cambium produce xilema secundario y floema secundario. Los tejidos primarios y secundarios pueden ser vistos en secciones transversales del tronco, cortadas debajo del meristemo apical. Los tejidos aparecen desde el centro hacia el exterior en el siguiente orden: médula, xilema primario, xilema secundario, cambium, floema secundario, floema primario, corteza y epidermis.

El cambium está compuesto por capas de “células apicales iniciales” de una sola célula de espesor y por un pequeño pero variable número de capas de células derivadas de las iniciales, que no están diferenciadas. El reconocimiento de las apicales iniciales es prácticamente imposible, y por esa razón estas complejas formaciones son usualmente llamadas regiones cambiales. Durante la época de no crecimiento esta región o

zona cambial es relativamente compacta. En la primavera, antes de que comience la división, la zona cambial se expande; las células se hinchan e incrementan su diámetro. Por otra parte, durante la época de no crecimiento la transición desde la zona cambial a xilema es abrupta, mientras que en la época activa esta transición es gradual.

El cambium consiste en células iniciales apicales que son fusiformes y radios medulares. La mayoría son fusiformes (alargadas en forma de huso, lo que se puede ver en secciones tangenciales). Las iniciales que son radios medulares son estrechas y cortas, ligeramente alargadas a casi isodiamétricas. Las iniciales fusiformes producen todas las células axiales del xilema (traqueidas, fibras, vasos, parénquimas axiales) y las respectivas células del floema, mientras que los radios medulares se originan en los radios medulares iniciales.

Como ya se dijo las células madre se dividen para formar las células madre del xilema y floema, que gradualmente se van convirtiendo en xilema (madera) y floema (corteza). El intervalo entre divisiones sucesivas varía con el tiempo (más temprano o más tarde en el crecimiento de primavera), la especie y las condiciones ambientales. Normalmente las divisiones en las células madre ocurren más lentamente que en los meristemos apicales. La alteración entre producción de floema y xilema no es algo regular. En primavera hay más actividad del lado del xilema, por lo tanto se producen más células de xilema que de floema.

El mecanismo que estimula la actividad en la zona cambial, no es del todo claro. Es globalmente aceptado que esos estímulos provienen de hormonas de crecimiento (mayormente auxinas). Se cree que los estímulos para el crecimiento surgen en regiones apicales de los tallos en crecimiento; las hojas jóvenes son fuentes ricas en auxinas. La actividad comienza por debajo de los brotes de hinchazón y se expande hacia abajo por el floema; esta expansión se da más rápido en maderas de anillos porosos que en maderas de poros difusos. No obstante, hay evidencias de que el inicio en el paso del cambium del “reposo” a la actividad puede darse grupal o individualmente en células de la zona cambial.

A diferencia de en el crecimiento en altura, la división sucede en el cambium y por lo tanto el crecimiento es diametral y depende prioritariamente de la fotosíntesis. Al comienzo de un período de crecimiento, el alimento sintetizado almacenado en el período anterior puede ser utilizado por el crecimiento en diámetro.

Las nuevas células producidas por el cambium incrementan el diámetro del tronco, las ramas y las raíces; por lo tanto el anillo del cambium también debe crecer. En cierto grado esto se debe a un

incremento del diámetro tangencial de las iniciales. Este crecimiento en diámetro es obviamente insuficiente para el crecimiento del anillo del cambium por tanto este crecimiento se adjudica principalmente a la adición de nuevas Iniciales.

En maderas coníferas y en la mayoría de las maderas latifoliadas, las nuevas iniciales fusiformes son producidas por las ya existentes, por la formación de paredes semi transversales; estas pueden tener varios grados de inclinación respecto a los ejes de iniciales. Las células resultantes de estas divisiones se alargan verticalmente por ambos extremos hasta alcanzar el tamaño de las iniciales originarias.

Las nuevas iniciales son mayormente producidas en el final de la máxima actividad del cambium en cada temporada de crecimiento. El desarrollo de las iniciales (y sus derivados) aparentemente depende de la extensión de su contacto con los radios medulares a través de los cuales reciben su alimento sintetizado.

El comienzo, final y duración del tiempo en el que el cambium produce células de xilema y floema, puede variar año a año así como por la especie de cada árbol individual. En la época de crecimiento, la actividad cambial puede verse afectada por factores ambientales como la temperatura del suelo y el aire, intensidad de luz, duración del día y la disponibilidad de humedad y alimento.

En zonas templadas, la actividad cambial está restringida a los meses más calurosos. El incremento del crecimiento anual se distingue gracias a la diferencia de las células de primavera con las de verano. Las células de largo diámetro de los anillos de primavera son producidas durante el comienzo de cada temporada en que el crecimiento en altura está activo; esto es asociado a una alta síntesis de auxinas. Las células de diámetro estrecho de los anillos de verano son producidas después del cese de la temporada de crecimiento en altura.

El cambium es un tejido con larga duración de vida, con capacidad de renovarse pudiendo vivir cientos y hasta miles de años y una gran capacidad de curación de heridas locales. Sin embargo, ambientes adversos pueden causar anomalías en la división del cambium y por lo tanto en todo árbol.

Desarrollo celular

El desarrollo celular se divide en 4 etapas: 1) Etapa de origen: esta etapa refiere a la producción de las células y ya fue discutida anteriormente.

2) Etapa de alargamiento (crecimiento superficial): las células nuevas se alargan hacia su forma y tamaño finales gracias al incremento de diámetro y altura; en muchos casos estas se vuelven varias veces más largas que las iniciales. Las parénquimas y los vasos no exceden en largo a sus iniciales, pero los vasos en algunas especies exceden en varias veces su diámetro respecto a los vasos iniciales, especialmente en la madera de primavera de latifoliadas de anillos porosos. El alargamiento se da gracias a la extensión de la pared primaria. Esta extensión tiene la propiedad de aflojar las cadenas de microfibras y reorientar las mismas en dirección del crecimiento en altura o alargamiento.

3) Etapa de ensanchamiento de la pared celular: al final de la etapa de alargamiento, los límites de las células nuevas consisten solo en pared primaria. A esto le sigue la deposición de la pared secundaria por el protoplasma. El grosor de la pared secundaria varía según especies, tipo de células y otros factores; también varía entre células de madera de primavera y verano respectivamente, especialmente en las células traqueidas de las coníferas. El ensanchamiento de la pared celular gracias a la deposición de la pared secundaria está muy asociada a la formación de puntuaciones en la madera, aunque el origen de puntuaciones puede ser adjudicada a la deposición de la pared primaria.

4) Etapa de lignificación: La lignificación es la última etapa del desarrollo de la célula. Esto involucra la alteración química de la pared celular (deposición de la lignina). Fue observado que esto sucede primero en las células de los extremos, después se extiende simultáneamente en la lamela central y la pared secundaria. Luego de finalizada la lignificación se cumple que el protoplasma es consumido totalmente. Así, con excepción de unas pocas filas de células jóvenes en desarrollo y parénquimas en la albura, todas las células maduras están muertas por la falta de núcleo y protoplasma.

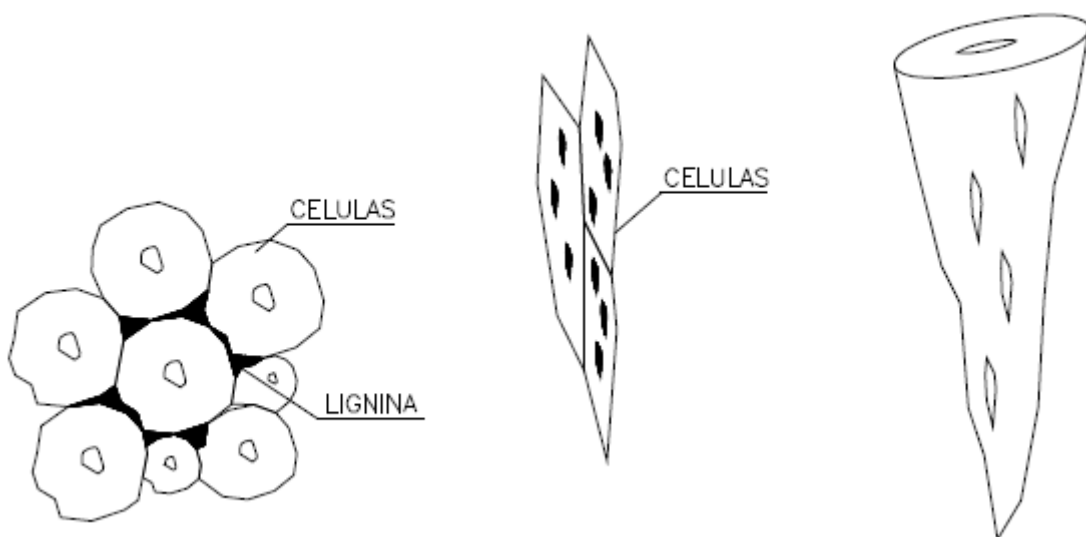


Figura 6 – Crecimiento celular

1.6 – Variación de la estructura de la madera

La estructura de la madera varía según la edad del árbol. Esto se evidencia, por ejemplo, en cortes transversales donde se aprecia que el ancho de los anillos de crecimiento no es uniforme. En general existe una variación horizontal (Desde la médula hasta la corteza) y una vertical (Desde la base a la copa).

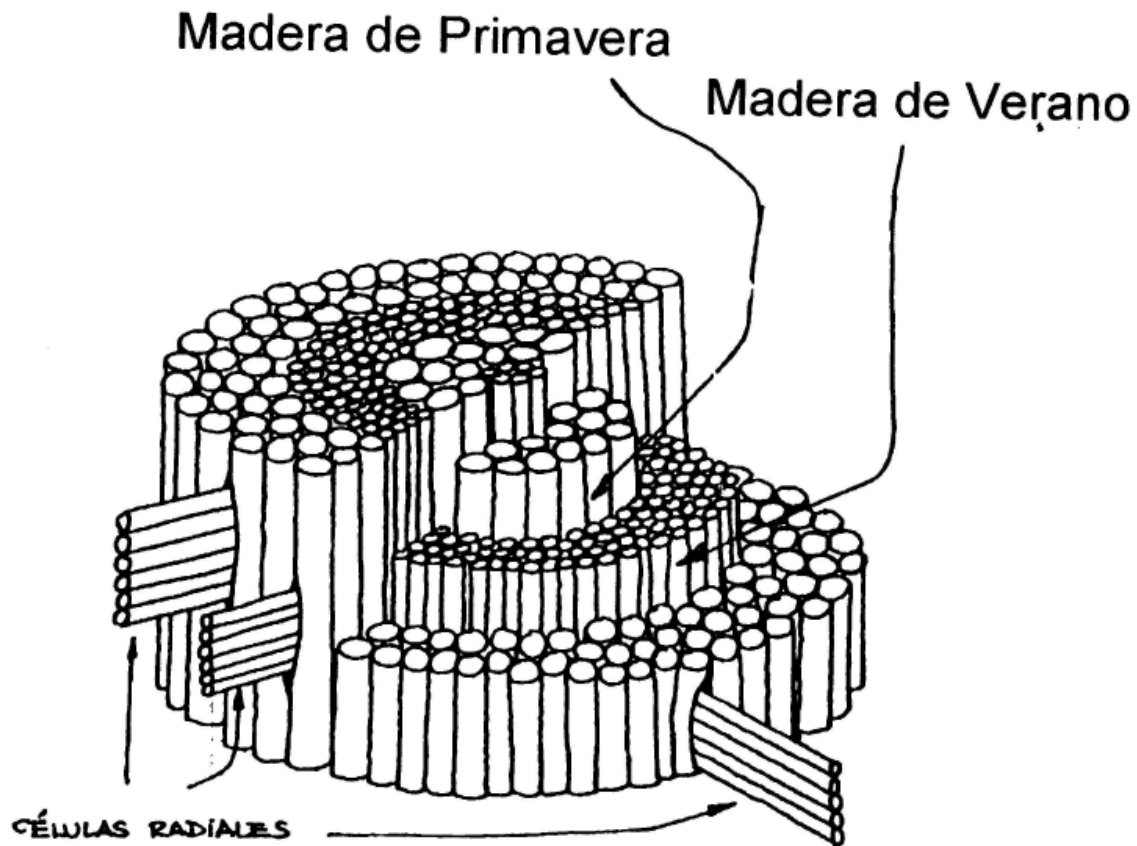


Figura 7 – Anillos de crecimiento

Variación horizontal

1. Generalidades

El estudio de la madera lleva a la conclusión que determinadas características generales tienden a seguir un patrón más o menos típico.

a) Anillos de crecimiento: En las coníferas, los anillos cercanos a la médula poseen menos madera de verano en comparación a los desarrollados posteriormente. En las latifoliadas de anillos porosos, esta característica se desarrolla progresivamente; es decir que los anillos más cercanos a la médula aún son de poros difusos.

b) Morfología de las células: La investigación sobre la variación de tamaño de las células es particularmente concluyente respecto al largo de las mismas. Se puede decir que las células traqueidas en el tronco y ramas del árbol aumentan de tamaño desde adentro hacia afuera hasta alcanzar un tamaño determinado el cual permanece constante para los próximos anillos de crecimiento. En las coníferas es particularmente visible este fenómeno, mientras en las latifoliadas las diferencias de tamaño son difusas y el límite se alcanza rápidamente. El estudio de otras células (Vasos, fibras etc.) y de otras características de las mismas (Diámetro, ancho de las paredes etc.) no conduce a resultados generales, por lo cual es menos abordado.

c) Composición química: En general, el contenido de celulosa tiende a incrementarse desde la médula hacia afuera siguiendo un patrón similar al del largo de las células. El contenido de lignina decrece gradualmente en dicha dirección.

2. Formación del duramen

Los cambios asociados a la formación del duramen pueden ser macroscópicos (Color) o microscópicos (Muerte de células).

El cambio de color se debe al depósito de compuestos extractivos cerca de la médula que impregnan las paredes celulares.

La muerte de las células es producida principalmente a la acumulación de desechos producidos por el metabolismo celular. Estos son trasladados cerca del centro del árbol, lo que va creando un cilindro de duramen que se expande gradualmente. Durante este proceso, todo el almidón es consumido y la madera de la albura se transforma en duramen.

3. Variación dentro de los anillos.

Dentro de cada anillo existen variaciones en la disposición de las células o en el ancho de las paredes de las mismas; esto se debe a las diferencias entre la madera de verano y la de primavera.

En general, las células de la madera de verano (Traqueidas, fibras y vasos) son más largas que las presentes en la madera de primavera. Además, en la madera de verano hay mayor contenido de celulosa y menos de lignina en relación a la de primavera.

4. Variación entre anillos

La variación entre distintos anillos es considerada debido a la variación en el ancho de los mismos. Esta magnitud tiende a decrecer a medida que se recorre el árbol desde la médula hasta la corteza.

Esta variación se puede atribuir a la proporción de madera de verano presente y al largo de las células.

La primera característica debe ser solamente considerada en maderas latifoliadas de poros anillos porosos; en estas se puede apreciar que un incremento en el ancho de los anillos es asociado a un incremento de la presencia de madera de verano. En las de poros difusos no es posible

establecer dicha relación. En dichas maderas se aprecia que un incremento en las células de paredes anchas, propicia el incremento del ancho de los anillos.

Con respecto al largo de las células, no hay un consenso general al respecto. Sin embargo, la tendencia indica que los anillos más anchos poseen células más cortas.

Variación vertical

La variación vertical es esperada debido a que a diferentes alturas, el árbol está compuesto por anillos de diferente estructura.

El ancho de los anillos de crecimiento desde la base del árbol hasta alcanzar un máximo cerca de la parte baja de la copa.

La proporción de madera de verano es mayor cerca de la base y decrece con la altura. De esta misma forma varía el contenido de celulosa.

El tamaño de las células también varía con la altura. Se observa que dentro de un mismo anillo, la longitud de las mismas aumenta desde la base hacia arriba y alcanza un máximo antes de llegar a la copa donde éste es menor que en la base.

1.7 – Anomalías en la madera

Las desviaciones de la estructura de los árboles no son raras, ya que estos son organismos vivos y están sujetos a diversas influencias durante su vida. Cuando la madera es considerada como materia prima, la mayoría de las anomalías afectan negativamente su valor y son comúnmente llamadas defectos.

Estas anomalías en el crecimiento, causadas por influencias ambientales sobre los árboles se pueden clasificar como:

Desviaciones de forma

Lo que llamamos “forma típica del árbol”, es cuando este se encuentra en posición vertical, prácticamente de forma cilíndrica, y de sección transversal circular; por lo que llamamos anomalías de forma a las desviaciones en su verticalidad, su forma de cilindro, o en su sección.

La acción de diversos factores ambientales puede provocar que los troncos de los árboles se desvíen de su posición vertical o de su forma cilíndrica, dejando a estos inclinados, torcidos, bifurcados o en forma de culata. Los factores pueden actuar mecánicamente (viento, nieve, movimientos del suelo, etc.), fisiológicamente (la luz) o por la destrucción de

sus ramas (heladas, sequías, animales, insectos, hongos, o inclusive los humanos).

Las desviaciones de sección transversal circular pueden ser hereditarias en la naturaleza, pero generalmente son causadas por influencias ambientales como la acción del viento, o por un desarrollo unilateral de la corona del árbol.

Todas las desviaciones de la forma típica, sobre todo si son muy pronunciadas, producen una gran cantidad de desperdicios de manufactura, y producen anomalías de los granos, afectando las propiedades (resistencia y estabilidad) de la madera.

Desviaciones de grano

Cuando el alineamiento de las fibras en una pieza de madera no coincide con el eje axial de la misma, se dice que la madera tiene desviación de grano.

Cualquier forma de grano desviado que se presente en la madera estructural es un defecto, ya que reduce la resistencia mecánica de la madera. Pero las formas irregulares del grano desviado, ya sea en espiral, diagonal, entrecruzado, o combinaciones de estas, se utilizan con fines decorativos, por las atractivas formas que producen.

El grano en espiral, es aquel en el cual las fibras se alinean en una orientación helicoidal alrededor del eje del tallo, dando una apariencia retorcida al tronco después que se ha retirado su corteza. La apariencia retorcida se acentúa por las grietas superficiales, paralelas a la dirección de las fibras. Este tipo de defecto se da tanto en coníferas como en latifoliadas, y es tan común, que la madera con el grano completamente recto es muy escasa. La desviación de este estilo, es un defecto muy grave, ya que la resistencia de la madera puede ser considerablemente menor a la normal (dependiendo de la desviación y el tipo de carga), sobre todo la capacidad de la madera para soportar impactos.

La desviación en diagonal de los granos se puede dar a partir de fibras totalmente rectas. Esto se da cuando la madera no se labra de forma paralela a los anillos de crecimiento en árboles de forma más bien cónica, o en árboles con circunferencia irregular.

Se le llama grano entrecruzado, a la desviación de las fibras de la madera en el tronco de un árbol. El corte de superficies radiales en este tipo de madera produce lo que se conoce comúnmente como veteado.

Anillos anormales

Una disposición diferente a la normal de los anillos de crecimiento puede incluir excentricidad, anillos falsos, anillos discontinuos y la formación de multi-médulas.

La excentricidad puede ser causada por un desarrollo unilateral de la corona del árbol, lo que equivale a que uno de los lados recibe una mejor nutrición. Sin embargo, en muchos casos, es un resultado de la desviación del tronco de su posición vertical. Además de la disposición excéntrica de los anillos, y el ancho desigual que tenemos como resultado, esta anomalía es a menudo asociada con la madera de reacción.

Los anillos falsos se forman en respuesta a diversos agentes ambientales que causan disturbios intraestacionales de crecimiento, resultando en que se forma más de un anillo de crecimiento por temporada. Estos anillos se pueden formar por defoliación debida a heladas tardías; por ataques de insectos u hongos durante la temporada de crecimiento, reanudando el crecimiento entre verano y otoño debido a las condiciones excepcionalmente favorables; o por uno o más períodos de sequía seguidos de mucha lluvia. La estructura de estos tipos de anillos presenta desviaciones celulares. En las coníferas, tales anomalías se notan principalmente en el espesor de la pared celular, pero en las latifoliadas, pueden aparecer en la distribución, el número y diámetro de los vasos u otros elementos celulares.

Los anillos discontinuos, como lo dice su nombre, son anillos de crecimiento que no forman un círculo completo alrededor de la médula. Aparte de lesiones locales en el cambium, estos anillos se pueden deber a la inactividad del cambium debido a la desnutrición. Este último caso parece ser el de los árboles fuertemente inclinados, que tienden a desarrollar coronas de un solo lado. Pero la aparición de anillos discontinuos en árboles completamente verticales, lo hace un fenómeno muy difícil de explicar.

Pese a que los anillos falsos y los discontinuos son anomalías estructurales, no se consideran como defectos, ya que no tienen ningún efecto adverso en el valor de servicio de la madera. Su importancia práctica, está más bien relacionada con la edad y el crecimiento, ya que pueden provocar que los silvicultores subestimen o sobreestimen el potencial de crecimiento de los árboles mediante una estimación errónea de su edad.

Finalmente, la formación de las multi-médulas, se observa a menudo en las secciones transversales de un tronco en la base de una bifurcación, ya que puede ser el resultado de una rama dentro del tallo principal, el crecimiento de dos o más brotes muy poco espaciados.

Madera de reacción

Pese a ser anomalías, muchos conocedores opinan que la madera de reacción debe considerarse como algo normal, debido a la frecuencia y cantidades en que se encuentra.

Se puede definir a la madera de reacción como aquella que se forma debido a la reacción de un árbol, ante los esfuerzos anormales a los que se ve sometido cuando crece inclinado.

En las coníferas, la madera de reacción se forma en la parte inferior del tronco, y el lado que tiende a ser convexo se denomina madera de compresión. En la sección transversal de un corte en esta parte, se observa una zona donde los anillos de crecimiento se vuelven más anchos, esta es la zona de compresión. La madera de compresión tiende a ser más oscura que el resto con un tono pardo rojizo. Cuando la intensidad es muy grande, los anillos de crecimiento, dan la sensación de estar constituidos únicamente por madera de verano. En cambio cuando la proporción es pequeña, la diferencia es difícil de apreciar macroscópicamente.

Para determinar con precisión que la madera observada es de compresión, cuando esta ha sido medianamente afectada, es necesario realizar una observación microscópica. Dicha observación revela estas características:

- La sección transversal de las traqueidas es circular, y por consiguiente se producen meatos.
- Las paredes celulares son gruesas, presentando fendas de entre 40% y 60% de inclinación con respecto al eje axial.
- Las traqueidas son entre un 10% y un 50% más cortas que las restantes, y con extremos comúnmente bifurcados.
- Los radios leñosos, en ocasiones suelen presentarse en mayor número y más gruesos.

-

Considerando a la madera como materia prima, tiene propiedades físicas diferentes a la normal; mayor peso específico, mayor contracción longitudinal (hasta diez veces más), y contracción tangencial y radial bastante menor. Químicamente, la madera de compresión difiere de la normal debido a su alto contenido de lignina y su menor cantidad de celulosa. Esta circunstancia supone una reducción notable de su aptitud para la obtención tanto de pasta química como mecánica, a la vez que ofrece mayor resistencia al blanqueado.

En latifoliadas, se da el caso de que la madera de reacción, crece en el lado superior del tronco que tiende a hacerse cóncavo, a la madera cortada en esta zona, se le llama madera de tensión. Análogamente, en la sección transversal de un corte en esta parte, se observa una zona donde los anillos de crecimiento se vuelven más anchos, esta es la zona de tensión.

La existencia de madera de tensión, es más difícil de identificar macroscópicamente. Es más densa, de aspecto gelatinoso, y de brillo más sedoso que la restante. Su color es más claro que el resto de la madera, por lo que es más fácil apreciarla en maderas oscuras. Los anillos de crecimiento suelen ser de mayor amplitud, aunque no se da tanto como en las coníferas. Como es madera más rica en celulosa y menos en lignina que la madera normal, la aplicación de colorantes de la celulosa como ioduro de zinc o fluoroglucina puede resaltar su presencia.

Microscópicamente tiene las siguientes características:

- Las fibras son gelatinosas, de paredes muy gruesas y prácticamente sin lumen.
- La vascularización es menor, tanto en número como en diámetro.
- Tiene una mayor proporción de fibras, son más largas que en la madera normal, pero su diámetro es más pequeño.

Como se puede apreciar, la madera de reacción tiene características mecánicas por debajo de las normales, por lo que no conviene la implementación de piezas que la contengan en cantidades significativas.

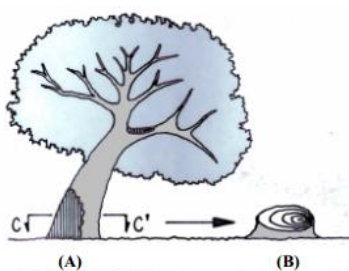


Figura 8 MADERA DE REACCIÓN. (A) madera de tensión en latifoliadas, (B) sección transversal C-C'.

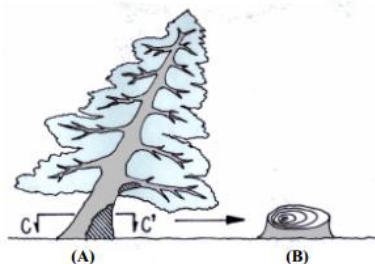


Figura 9 MADERA DE REACCIÓN. (A) madera de compresión en coníferas, (B) sección transversal C-C'.

Tejidos discontinuos

Esta categoría incluye fallas de compresión, sacudidas, o bolsas de resina. Las fallas de compresión (también conocidas como planos de deslizamiento o pliegues de compresión), son rupturas de la madera debido a compresión, en el sentido del eje axial (paralela al grano). Dichas roturas pueden ocurrir en la compresión interior de los árboles, que se inclinan debido a vientos, tormentas, o a la acumulación de nieve en su corona. El segmento dañado de los troncos desarrolla protuberancias o crestas (debido al crecimiento veloz y localizado), que pueden servir para el reconocimiento de este defecto.

Estas fallas son más comunes en árboles jóvenes y finos, expuestos a podas intensivas, ya que los mismos pueden verse afectados fácilmente por el viento u otras cargas. Pero también, pueden desarrollarse a partir del manejo descuidado en la tala, o en miembros de estructura de madera, como resultado de la aplicación de cargas muy pesadas.

Las sacudidas también son rupturas en la madera de árboles vivos, que pueden ampliarse después de que se corta el mismo, debido a la contracción de la madera, pero que se originan cuando el árbol está aún vivo. Estos movimientos pueden ser de dos tipos, movimiento de anillos o sacudidas del centro del tronco (corazón sacudido).

El movimiento de los anillos, son rupturas que se producen en paralelo a los anillos de crecimiento, ya sea en el límite de los anillos adyacentes, o dentro de un anillo de crecimiento.

Lo que conocemos como corazón sacudido, son rupturas a partir de la médula. Estas se presentan en sentido radial desde la médula hacia el exterior, sobre todo a lo largo de los radios medulares. Es posible que haya una grieta en un diámetro del tronco, o muchos radios en forma de “estrella” o “tela de araña”. Este defecto ocurre generalmente en la parte inferior del tronco de árboles más bien viejos, y se atribuye a las tensiones provocadas durante el crecimiento.

Las llamadas bolsas de resinas, se producen en las coníferas que poseen canales de resina. Son rupturas oblongas, y con forma de lente, de diversos tamaños, y por lo general se encuentran dentro de los límites de los anillos de crecimiento llenos de resina. El examen microscópico, muestra que estas cavidades se alinean con células parenquimáticas. La causa de las bolsas de resina es incierta, pero se atribuyen al balanceo o excesiva flexión de los árboles afectados.

Nudos

Los nudos son quizás el defecto natural más común en la madera. A medida que un árbol se desarrolla va envolviendo el arranque de las ramas. Los nudos son las porciones de las ramas que quedan rodeadas por la madera del tronco. Se le define como el área de tejido leñoso resultante del rastro dejado por el desarrollo de una rama, cuyas características organolépticas y propiedades son diferentes a las de la madera circundante. Comúnmente se presentan en la forma de:

1- Nudo sano: Conocido también como nudo vivo o nudo fijo, es la porción de rama interconectada con el resto de la madera, que no se soltará o aflojará durante los procesos de secado y uso de la misma. No presenta rasgos de deterioro ni de pudrición; este tipo de nudo se forma cuando las ramas están vivas y son envueltas por el tronco, resultando así que sus tejidos son continuos con los del xilema.

2- Nudo muerto: También se conoce como nudo flojo o nudo hueco (cuando se desprende el nudo). Este tipo de nudo se forma cuando una rama muere y queda un muñón que acaba rodeado por los tejidos del tronco. En este caso no existe continuidad entre los tejidos del nudo y los del tronco, y debido a ello, los nudos muertos se desprenden con facilidad cuando la madera es aserrada.

3- Nudos arracimados: Son dos o más nudos agrupados por las desviaciones de las fibras que los rodean y alteran en gran proporción el grano de toda la pieza. A todo el racimo se le considera como una unidad de nudo. La forma del nudo sobre los planos de corte depende de la dirección del corte respecto al nudo. Cuando el corte es perpendicular al nudo, éste aparece redondo; si el corte es oblicuo, el nudo aparece ovalado; y si es paralelo al eje, resulta en formas alargadas.

Los nudos se miden según el tipo de regla de clasificación empleada. La mayoría limita la presencia de nudos en función de su diámetro. Por ejemplo, la Norma Oficial Mexicana NMX-C-409-ONNCCE-1999 “Norma Mexicana de Clasificación Visual de Maderas Latifoliadas para Usos Estructurales”, se indica la forma en la que se pueden medir los nudos dependiendo del tipo que sean y de su posición en la madera aserrada. Cuando se tengan nudos en aristas, se mide su dimensión, tanto en la cara como en el canto, mediante la distancia entre la arista y una línea paralela a esta y tangente al nudo. Si los nudos están en el borde, se mide su dimensión entre dos líneas paralelas a la arista y tangente al nudo. Si el nudo está cortado por una arista, se mide su dimensión entre la arista y una línea paralela a ésta y tangente al nudo. Si está ubicado parcialmente en la zona central de la cara, y si más de la mitad de su tamaño está ubicado en la zona de borde, entonces se debe considerar como perteneciente al borde de la cara.

En el caso de nudos en el canto, se mide su dimensión entre dos líneas paralelas a la arista y tangentes al nudo. Si el nudo está cortado por una arista, se mide su dimensión entre la arista y una línea paralela a ésta y tangente al nudo. Para nudos en la zona central, se mide su diámetro mayor, su diámetro menor, y con ellos se calcula el diámetro medio. Si está ubicado parcialmente en el borde de la cara, se considera como perteneciente a la zona central, si más de la mitad de su tamaño, se ubica en esta zona.

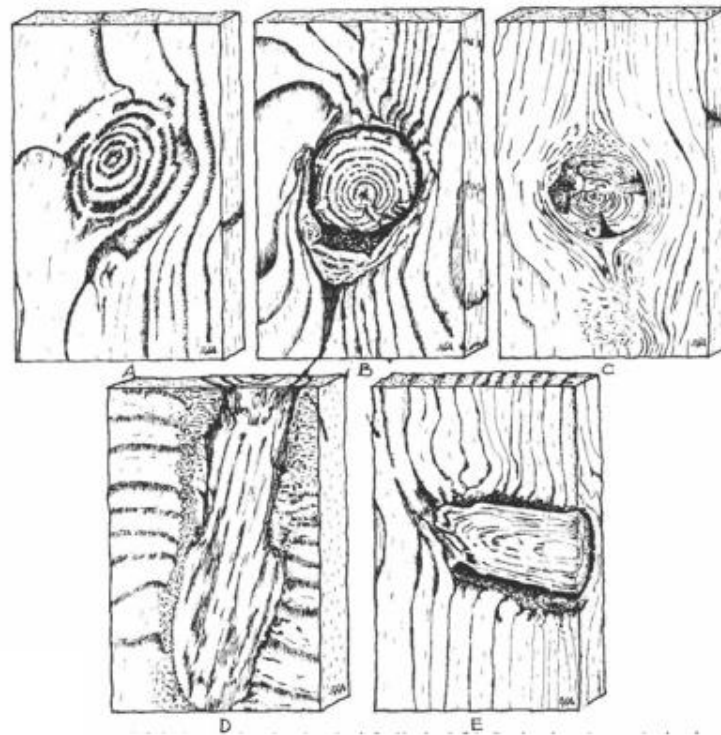


Figura 10 Esquema de los principales tipos de nudos en la madera: (A) nudo fijo, (B) y (C) nudo flojo, (D) nudo en forma de perno, (E) nudo en forma de perno mostrando la porción fija y la floja (Eenique y Robles, 1993)

II – PROPIEDADES

II.1 – Densidad

La densidad se define como la masa contenida en una unidad de volumen de material; la cual no debe confundirse con la densidad relativa que indica la relación de la primera con la densidad del agua. En el sistema métrico la densidad en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) o kilogramos por metro cúbico (kg/m^3). Ambas densidades son numéricamente iguales dado que la densidad del agua es de 1 g/cm^3 .

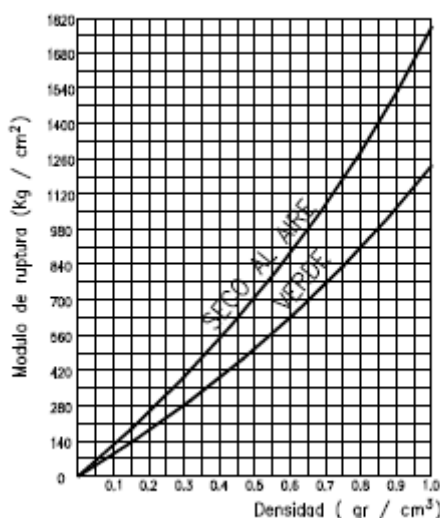


Figura 11 – Modulo de ruptura en función de la densidad

Factores que afectan la densidad

1. Humedad

La madera es un material higroscópico, es decir que tiene la propiedad de atraer y retener humedad. La absorción de humedad aumenta tanto el peso como el volumen; por esta razón, para comparar distintas muestras de maderas se debe establecer el contenido de humedad de las mismas.

Existen, sin embargo, ciertas condiciones en las que el peso y el volumen de la madera permanecen constantes; estas son la madera secada en horno y la completamente saturada. A partir de ellas se define la densidad relativa, como el cociente entre el peso y el volumen de la madera seca en horno y la densidad básica como el cociente entre el peso de la madera secada en horno y el volumen de la madera completamente saturada. El primer valor es superior al segundo dado que el volumen al secar la madera se reduce considerablemente. También es posible definir la densidad secada al aire donde se alcanza un contenido de humedad de aproximadamente 12 a 15 por

ciento y la aparente donde no se especifica el contenido de humedad la cual se calcula utilizando el peso y el volumen de la madera en dicha condición.

En el rango de 0 a 25 por ciento, la humedad de la madera puede ser calculada de la siguiente manera:

$r_u = \frac{1+u}{1+0.84r_0 \times u}$, donde r_u es la densidad con “u” por ciento de humedad; r_0 es la densidad secada en horno, u es el contenido de humedad en porcentaje.

2. Estructura

La madera está compuesta principalmente por células muertas formadas por una pared celular y la cavidad que se forma en el interior. La densidad de la madera varía según la cantidad de material (Dado por las paredes celulares) y por la cantidad de espacio vacío (Dado por las cavidades celulares). En este sentido, la densidad es una medida de material hay en un volumen dado y es un índice de cuanto espacio vacío hay en el mismo. Este puede ser calculado mediante la ecuación siguiente:

$C = \left(1 - \frac{r_0}{r_w}\right) \times 100$, donde “C” es la proporción de espacio vacío (En %); r_0 es la densidad secada en horno y r_w es la densidad de las paredes celulares.

Las diferencias en densidad y volumen del espacio vacío vienen dadas por diferencias anatómicas como ser, diferentes tipos de células, su respectiva distribución, el ancho de sus paredes y el tamaño de las cavidades.

3. Ancho de los anillos de crecimiento

La influencia de este fenómeno en la densidad depende del tipo de madera. En las coníferas no hay una gran relación entre ambas magnitudes, si bien la tendencia es que la densidad decrece a medida que aumenta el ancho de los anillos. En las latifoliadas de anillos porosos, la densidad aumenta, hasta un cierto nivel, con el ancho de los anillos. Sin embargo en las de poros difusos las magnitudes tampoco tienen una relación determinada.

Debe tenerse en cuenta que, anillos del mismo ancho no siempre tienen la misma influencia en el valor de la densidad. Esto se debe a su posición en el árbol o a diferencias en sus condiciones de crecimiento.

4. Proporción de madera de verano

La madera de verano está formada por células que poseen paredes más gruesas y menores cavidades que en la madera de primavera. Esto da como resultado una mayor densidad en la de verano que en la de primavera, lo que explica porque la densidad aumenta con a medida que aumenta la proporción de la primera.

Este fenómeno es claramente visible en las coníferas y en las latifoliadas de anillos porosos. En las de poros difusos, la madera de verano no es claramente distinguible; esto se debe a que dichas maderas presentan zonas angostas de células con paredes anchas cerca del final del anillo de crecimiento.

La proporción de madera de verano es la causa de la relación existente entre el ancho de los anillos de crecimiento y la densidad, debido a que dicha proporción varía con el ancho de los anillos. En las latifoliadas de anillos porosos, se aprecia claramente dicha correlación; a medida que aumenta el ancho, se incrementa la proporción de madera de verano.

5. Extractivos

Estos compuestos formados por distintas sustancias químicas (Grasas, resinas, azúcares, aceites, taninos, etc.) se depositan en las cavidades celulares y entre las paredes de las mismas. Su presencia da como resultado un aumento en la densidad del duramen en comparación a la de la albura y su remoción, que no afecta la estructura celular, resulta en una disminución de la misma.

Variación de la densidad

1 - Variación dentro del mismo árbol

La densidad varía dentro del tronco del árbol y así mismo entre el tronco, las raíces y las ramas. Dentro del tronco existe una variación vertical (desde la base a la copa) y una horizontal (desde la médula a la corteza).

a) Dirección vertical: En esta dirección hay una tendencia a reducirse la densidad a medida que aumenta la altura del árbol, especialmente en las especies coníferas. Esta reducción es debida a diversos factores mecánicos y biológicos. Desde el punto de vista mecánico el tronco es considerado una viga vertical, que bajo la influencia de factores como el propio peso, el viento y la nieve actuando en la copa, desarrolla en su base mayores tensiones, produciendo en dicha base una madera de mayor densidad y por tanto mayor resistencia. Se ha observado que los árboles que tienen menor influencia del viento desarrollan una madera de menor densidad. Otro factor que incrementa la densidad es la formación de duramen que, como ya fue dicho, tiene mayor densidad.

La variación vertical de densidad es también afectada por cierto tipo de madera atípica que es madera joven que se encuentra alrededor de la médula. Este fenómeno es dado porque la densidad de la madera joven es diferente (mayor o menor) a la madera madura.

b) Dirección horizontal: En esta dirección la variación está relacionada directamente con la variación vertical y por tanto es afectada por los factores anteriormente mencionados. En cada nivel horizontal la influencia de la edad en la densidad es más notoria, En especies coníferas la densidad es menor en la madera joven que se encuentra próxima a la médula, con el paso de los años asciende a un nivel “típico”, y finalmente se reduce en muy avanzada edad. Este fenómeno se produce debido a la variación del grosor de las paredes celulares y a la proporción de madera de verano.

En la mayor parte de las especies coníferas la densidad se ve reducida después de aproximadamente 100 años de edad. En edades jóvenes, la densidad es afectada mayormente por la distancia a la médula que por el ancho de los anillos de crecimiento; esto se da especialmente en maderas de rápido crecimiento.

En especies latifoliadas, se encontró que la densidad disminuye con el aumento de la distancia a la médula, pero no hay mucha información en lo que a densidad de estas especies respecta.

2 - Variación en la misma especie

Este tipo de variación es producida por agentes ambientales (suelo, clima, espaciamiento entre árboles, etc.) y por herencia genética. El efecto de los agentes ambientales se manifiesta por cambios en el ancho de los anillos de crecimiento, y la cantidad de madera de verano.

Dentro de los agentes ambientales, el que más afecta a la densidad, es el espacio que queda entre los árboles, que es determinado por las distancias de plantación, poda, y otras medidas de forestación. A mayor distancia entre árboles, se favorece la formación de

anillos de crecimiento más anchos, y en consecuencia, se modifica indirectamente la densidad. Como ya ha sido mencionado, anillos anchos en las primeras edades de la madera, le otorgan baja densidad en coníferas, y alta en latifoliadas de anillo poroso. Las grandes distancias, también favorecen el desarrollo de mayores copas, y por lo tanto más albura, que tiene menor densidad.

II.2 - Higroscopia

La higroscopicidad, es la propiedad de la madera de absorber o ceder humedad al medioambiente, y retenerla en forma de agua líquida. Esta propiedad se origina debido a la composición química de la madera, porque tanto la celulosa, la hemicelulosa, la lignina, las pectinas y ciertos extractos, son sustancias higroscópicas. Como consecuencia de esto, la madera siempre contiene humedad.

Esta característica, es una de las propiedades más importantes de la madera, ya que afecta a todas las demás propiedades básicas (densidad, contracción, propiedades mecánicas, etc.). Por lo tanto, es importantísima en el procesamiento industrial de la madera, como por ejemplo el secado, los tratamientos químicos, etc.

La higroscopia es una desventaja de la madera, desde el punto de vista de la estabilidad dimensional. Conocer la relación entre la humedad y las propiedades o el tratamiento de la madera, es necesario para una racional utilización de la madera, ya que tal conocimiento permite la aplicación correcta de las medidas que ayudan a evitar consecuencias adversas en el uso práctico.

Humedad en árboles

En árboles vivos, la humedad puede variar entre un 30% y un 300%, y depende de la especie, la posición de la madera en el árbol y de la época del año.

En las coníferas, el duramen contiene menos humedad que la albura; en cambio en las latifoliadas la diferencia no es tan pronunciada, e incluso la situación puede ser inversa.

La variación “vertical” de la humedad en la madera, también está mucho más acentuada en las coníferas, donde un incremento de la base hasta la cima de los árboles. En las latifoliadas, las diferencias son comparativamente más pequeñas, y no hay una tendencia definida en la dirección vertical (ni aumento ni disminución).

La influencia de las estaciones no es tan clara, sin embargo, de acuerdo a ciertas observaciones, la humedad es mayor en otoño que en primavera, pero dichas diferencias no son muy grandes.

La madera como material

Independientemente de la humedad que la madera pueda tener en un árbol vivo, la exposición a la atmosfera, resulta en la pérdida de humedad. La cantidad que finalmente es conservada, depende de las condiciones atmosféricas existentes. Por ejemplo, la madera que es guardada para evitar los efectos directos de las condiciones climáticas. Se estima que, en Europa varía entre un 6 y un 26%, en cambio en Estados Unidos, el rango se encuentra entre un 2 y un 24%. Inclusive en la zona tropical, la madera balsa puede alcanzar un máximo de 1000% de humedad.

Desorción y adsorción

El agua (de forma líquida o como vapor) en la madera se presenta en 3 formas, como parte integrante de los tejidos (agua de constitución), impregnada en las paredes de las células (agua de impregnación) y llenando el volumen hueco de los tubos (agua libre). En condición de saturación, la humedad se encuentra sólo en forma líquida. La condición teórica en la que las paredes celulares se encuentran saturadas, donde las cavidades están vacías, se llama punto de saturación de la fibra, y es aproximadamente de un 30% de humedad (varía dependiendo de la especie).

La cantidad de humedad contenida en la madera expuesta a la atmósfera no es constante, sino que está sujeta a constantes cambios. La pérdida de humedad es lo que llamamos desorción, y la ganancia de la misma es llamada adsorción.

Medición de la humedad

Para determinar el contenido de agua en la madera, se utiliza con frecuencia el método gravimétrico (secado por horno). Se corta una probeta de un largo de 3 a 4 cm en la dirección de las fibras y se pesa con una precisión de 0,1 g (P_G). En seguida, la probeta se seca en una estufa a una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas y se pesa nuevamente (P_0). Finalmente se calcula el porcentaje del contenido de humedad de la madera con la relación: $CH = \frac{P_G - P_0}{P_0} \times 100\%$.

Para obtener un buen resultado se deben tomar varias precauciones: La probeta debe cortarse no menos de 15 cm de los extremos de la tabla. No se debe dejar pasar más de algunos minutos entre el corte y la primera pesada de la probeta, si no envolver la probeta en

una bolsa o film de polietileno y mantener en un congelador bajo $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para determinar la distribución de agua en el espesor de la madera (gradiente de humedad), se divide una probeta en tres secciones, dos superficiales y una central. Cada sección se pesa, se seca en estufa a $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante, igual como la probeta para la determinación del contenido de humedad.

Además del método gravimétrico, otros métodos más rápidos para determinar la humedad de la madera son los métodos eléctricos (xilohigrómetro). El xilohigrómetro eléctrico mide las propiedades eléctricas de la madera, tales como la resistencia eléctrica y la constante dieléctrica.



Figura 12 - Xilohigrómetro

El xilohigrómetro de resistencia es un instrumento que mide la resistencia eléctrica de la madera mediante electrodos en forma de agujas montadas en el extremo de un martillo y que se clavan con un golpe en la madera. Para utilizarlo bien, es conveniente conocer el principio de su operación y sus limitaciones.

La madera tiene una resistencia eléctrica que depende de la especie, y varía fuertemente con el contenido de humedad y en menor grado con la temperatura. En el estado seco (a 9% de humedad y 20°C) la madera es un muy buen aislante eléctrico con una resistencia eléctrica aproximada de 1.000 millones de ohm. En cambio, a 30% de humedad la resistencia eléctrica es de 200 mil ohm, y a 80% de humedad la resistencia eléctrica de la madera es de 11 mil ohm. La relación entre

resistencia eléctrica cambia entre 20% y 10% de humedad por un factor aproximado de 4 mil, mientras que entre 50% y 40%, cambia solamente por un factor de 2. Se desprende entonces, que la sensibilidad del instrumento es mucho más grande a bajas humedades que a altas humedades de la madera. No obstante, a contenidos de agua por debajo de 8%, la resistencia eléctrica es tan alta (más de 10.000 millones de ohm) que la medición es casi imposible, como consecuencia de corrientes parásitas pasando por el material aislante que separa los electrodos del instrumento.

En la práctica el medidor de humedad de resistencia funciona bien entre las humedades de contenidos de agua entre 8% y 25%, con una precisión del orden de ± 2 . Con todo existen en el mercado aparatos con escalas de 5% o 6% hasta 100% pero se debe tener mucho cuidado al interpretar los resultados fuera del rango de 8% a 25%, ya que se pueden indicar valores muy imprecisos.

Aparte del contenido de agua, influye también la temperatura. Por lo tanto, antes de tomar una medición hay que esperar que la madera se haya enfriado a la temperatura ambiente, o utilizar los factores de corrección indicados por el fabricante del aparato. Por ejemplo si se mide el contenido de agua en una pieza que tiene 12%, medidor indicara efectivamente 12% a 20°C, pero 15% a 40°C, 18% a 60°C y 21% a 80°C. Varios modelos traen incorporado un selector para corregir el efecto de la temperatura. La indicación del medidor de humedad puede también variar con diferentes especies.

Por otra parte, el único otro método utilizado en la industria es el medidor que funciona según el principio de la capacidad eléctrica. En vez de la resistencia eléctrica, mide una propiedad denominada la constante dieléctrica de la madera. Al contrario de la medición según el principio de la resistencia eléctrica, la medición por capacidad depende de la densidad de la madera, por lo tanto, el aparato debe ser calibrado para cada especie. Este método es especialmente útil cuando se precisa conocer el contenido de agua en la superficie de la madera, lo que puede ser importante para el encolado o laminado. Los electrodos tienen forma de superficies planas y no dañan la madera porque no la penetran como los electrodos en forma de agujas, empleados en el medidor de resistencia eléctrica. Un xilohigrómetro dieléctrico provisto de un sensor electromagnético permite medir la humedad en toda una superficie, pudiendo penetrar hasta unos mm al interior de la madera.

En adición algunos medidores eléctricos permiten la posibilidad de almacenar datos, realizar cálculos estadísticos y

descargar la información en una computadora, lo que da mayor versatilidad al método.

Existen otros diversos métodos para medir humedad en la madera tales como radiación infrarroja, microondas o por destilación, pero ninguno de ellos es de importancia práctica para la industria maderera.

II.3 – *Contracción e hinchamiento*

El término contracción se refiere a una reducción de las dimensiones de la madera debido al cambio en su contenido de humedad; hinchamiento hace referencia al fenómeno de incremento de las mismas. Estos cambios suceden cuando se varía el contenido de humedad de la madera por debajo del punto de saturación de la fibra (PSF); los cambios de humedad que suceden por encima de este no producen variaciones dimensionales independientemente de su magnitud.

La madera es un material anisotrópico. Con respecto a la contracción, los cambios en la humedad producen variaciones de volumen distintas para cada dirección de crecimiento. De este modo, los cambios en la dirección longitudinal son los menores, seguidos por los de la dirección radial y los mayores se dan en la dirección tangencial.

Factores que afectan la contracción

1. Humedad: La contracción se ve muy afectada por el contenido de humedad que varía entre cero y el PSF. Esta relación es casi lineal y se aplica en todas las direcciones de crecimiento. Se ha observado que esta relación es afectada por el tamaño del árbol utilizado para medirse. Grandes especímenes no otorgan resultados consistentes debido a que la humedad está distribuida de forma heterogénea. Debido a este fenómeno es que se forman tensiones internas que afectan el cambio dimensional y esta puede ser la razón de que en ciertos casos suceda el fenómeno de contracción en variaciones de humedad por encima de PSF. Por todo esto es que se deben utilizar árboles pequeños de tamaño estandarizado para su correcta medición y comparación.

2. Densidad: Las maderas que poseen altas densidades, se contraen y se hinchan más que las de bajas densidades. Esto se debe a que en las maderas de alta densidad, hay presente mayor cantidad de material debido a las paredes celulares más anchas. Se ha observado que en las variaciones en el contenido de humedad, el tamaño de las cavidades celulares permanece prácticamente constante y son sólo las paredes que varían dimensionalmente.

La relación entre la contracción y la densidad está directamente conectada con la relación entre contracción y humedad; esto se debe a que como se dijo antes, maderas de mayor densidad contienen mayor humedad en las paredes celulares.

A medida que se aumenta la densidad, disminuye la anisotropía es decir que la diferencia de contracción entre las direcciones es menor. Sin embargo, la anisotropía se incrementa cuando la madera contiene mayor humedad.

3. Extractivos: En maderas que poseen una gran concentración de estos compuestos, se produce una disminución de la contracción, que es proporcional al espacio que ocupan los mismos en las paredes celulares. La remoción de los extractivos aumenta la contracción e hinchamiento.

4. Composición química: La influencia de la composición química de las paredes celulares no es muy considerable, sobre todo en lo que respecta a la celulosa. Sin embargo, la lignina tiende a restringir la contracción. La lignina también es una de la responsable de otorgarle mayor contracción a las maderas de alta densidad, dado que se ha observado que el contenido de lignina se reduce cuando se incrementa la densidad. Las especies latifoliadas se contraen más que las coníferas, a densidades similares, debido a este fenómeno.

En determinadas especies, la relativamente baja contracción se debe en parte a la presencia de extractivos pero también se le atribuye al bajo contenido de hemicelulosa hidrolizada.

5. Tensiones mecánicas: Estas tensiones se pueden producir cuando se aplican cargas externas o durante la absorción o pérdida de humedad. Si son suficientemente grandes, pueden ocasionar deformaciones permanentes en las paredes celulares, esto provoca cambios secundarios en la contracción de la madera. Grandes tensiones de compresión le confieren a la madera una contracción mayor a la normal debido a la reducción del tamaño celular.

Anisotropía de la contracción

La diferencia en la contracción para los diferentes sentidos de crecimiento es principalmente atribuida a la estructura de las paredes celulares. Estas están formadas por una pared primaria y una secundaria. La primaria es muy fina, mientras que la secundaria está compuesta por tres capas donde las microfibras se orientan de forma diferente. En la más interna y en la más externa, las microfibras aparecen orientadas transversalmente al largo de la célula; mientras en la capa del medio (Que es también la más gruesa) se orientan de forma paralela al largo de la célula.

Cuando se absorbe humedad, la capa del medio tiende a hincharse en proporción a la cantidad de microfibras mientras

que las otras dos capas ejercen un efecto que restringe dicho hinchamiento debido a su orientación. La orientación de las células de la capa del medio son las responsables de la baja contracción e hinchamiento producido en el sentido longitudinal. Si estas se presentaran perfectamente paralelas, el crecimiento de la dirección longitudinal sería nulo; el crecimiento, justamente, es debido a las pequeñas desviaciones del paralelismo de las mismas.

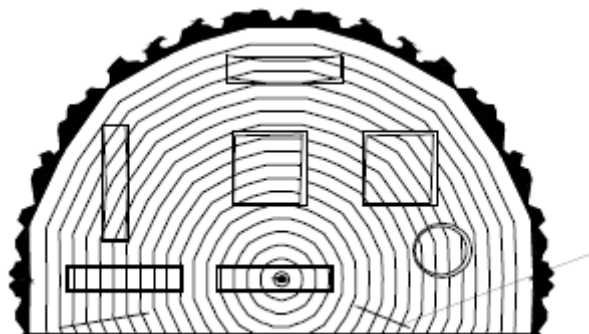


Figura 13 – Contracción de la madera

La razón de la diferencia de contracción entre el sentido radial y el tangencial no se conoce con exactitud. En parte es debida a la presencia de radios medulares, que dada su orientación, producen una restricción a la contracción o al hinchamiento radial. En algunas especies, la remoción de los mismos aumenta la capacidad de contracción. El fenómeno de restricción de los radios medulares es atribuido a la dirección de las microfibras de las paredes celulares de los mismos; estas se orientan mayormente paralelas al largo de la célula.

La diferencia en la densidad de la madera de verano y la de primavera, es considerada otra causa de la anisotropía. La madera de verano se contrae e hincha más fácilmente debido a su mayor densidad, lo que produce que la madera de primavera de sus alrededores siga la misma tendencia. Dado que los anillos de crecimiento se ordenan tangencialmente, la contracción en esta dirección es mayor. Esta explicación es particularmente aplicable a las especies con densidades bien diferenciadas entre madera de verano y de primavera.

Otro fenómeno que puede generar anisotropía es la presencia de lignina. Se ha observado que la remoción parcial de la lignina aumenta la contracción, debido a que el espacio que esta ocupaba pasa a ser llenado por agua. El fenómeno de aumento de la contracción por remoción de lignina se produce principalmente en la dirección radial dado que esta se encuentra más presente en las paredes radiales.

Determinación de la contracción

La contracción en sí propia es calculada en base a las dimensiones de la madera verde, por sobre el PSF; mientras que el hinchamiento se calcula en base a las dimensiones de la madera seca. Los valores son expresados por unidad de la condición inicial (Verde o seca según el caso) o en porcentaje respecto de las mismas. Para esto se utilizan las siguientes fórmulas:

1. Para el hinchamiento: $b = \frac{l_1 - l_2}{l_1}$ ó $b\% = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \times 100$

donde b es el hinchamiento (En % o en cm/cm), l_1 es la dimensión de la madera verde (En cm) y l_2 es la dimensión de la madera seca.

2. Para la contracción: $a = \frac{l_1 - l_2}{l_2}$ ó $a\% = \frac{l_1 - l_2}{l_2} \times 100$

donde a es la contracción (En % o en cm/cm), l_1 es la dimensión de la madera verde (En cm) y l_2 es la dimensión de la madera seca.

Combinando las relaciones anteriores se puede obtener la fórmula $a = b/(1 - b)$ que demuestra que la contracción e hinchamiento tienen valores distintos incluso para la misma dirección.

Importancia de la contracción

Los cambios dimensionales asociados a la contracción y al hinchamiento de la madera, pueden producir la degradación de la misma. Esta degradación puede ser producida por simplemente un incremento o disminución de volumen o por la anisotropía de estos cambios. Como resultado, varios defectos pueden desarrollarse los cuales aparecen en condiciones normales, y los cuales son acentuados cuando la madera es exigida a tracción o compresión. Entre ellos se pueden encontrar alguno de los siguientes:

1. Apertura o encogimiento de juntas: Es producido por la variación de dimensiones. Un incremento en las mismas produce dificultad para abrir puertas, ventanas o cajones mientras una reducción produce aperturas en pisos, pérdida de uniones en muebles, etc.

2. Variación de forma de la sección transversal: Este fenómeno es debido a la diferencia de contracción e hinchamiento en la dirección radial y tangencial lo que produce que la forma varíe cuando la madera se seca

3. Pandeo: También puede ser producido por las diferencias entre la dirección tangencial y la radial o por la distribución de humedad heterogénea

4. Grietas: Estas pueden aparecer debido al cambio desigual de dimensiones debido a la diferencia de humedad entre el interior y el exterior de la madera y aparecen cuando esta es secada. En general aparecen en la dirección de los rayos que constituyen un planos de debilidad.

Estos defectos se pueden explicar básicamente de la misma forma. Cuando la madera es secada, la humedad de la superficie es la primera en desaparecer lo que le produce a esta una tendencia a contraerse. Esta contracción sucede antes que en el núcleo, lo que genera tensiones en la superficie propiciando deformaciones en la capa exterior y la consiguiente formación de defectos.

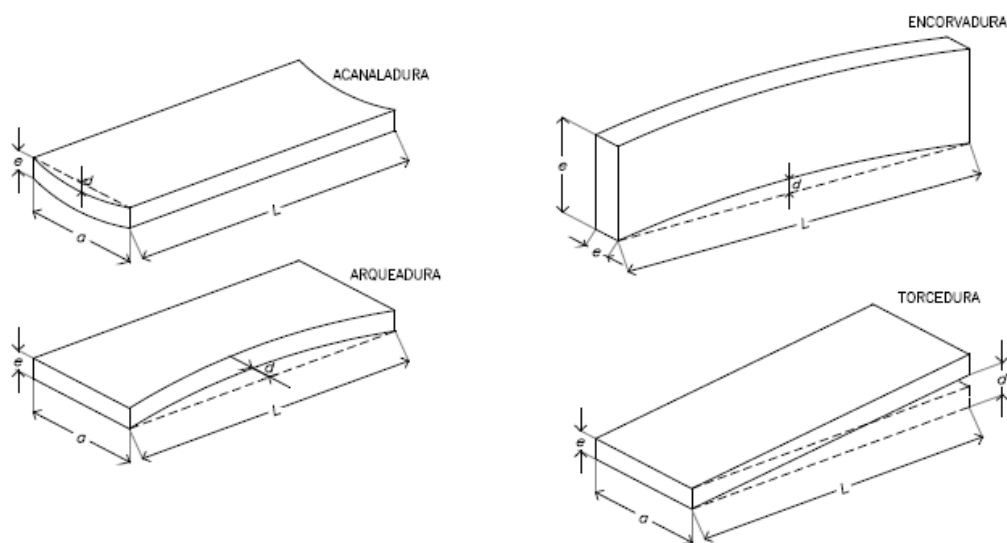


Figura 14 - Pandeo

Control de la contracción

Los efectos adversos de la contracción han llevado a buscar métodos para su control de forma de asegurar estabilidad dimensional en la madera. Las dificultades encontradas para hallar dichos métodos radican en el hecho de que es casi imposible controlar la higroscopia de la madera. Sin embargo, se han encontrado algunos que reducen considerablemente la magnitud de la contracción y el hinchamiento pero su aplicación no es muy habitual debido a su efectividad, costo, método de aplicación y efecto negativo sobre otras propiedades de la madera. Entre ellos se destacan los siguientes:

1. Modificación mecánica: La redistribución de la masa de la madera mediante procesos mecánicos reduce su anisotropía y consecuentemente su contracción. Esto se observa, por ejemplo, en la madera contrachapada, donde la colocación de las sucesivas capas de madera

que la conforman en ángulos determinados se elimina casi completamente la anisotropía de la misma. En los tableros de partículas y de fibras, sucede un fenómeno similar.

2. Revestimiento impermeable: Se puede realizar mediante la aplicación de pinturas o barnices que si bien no son totalmente impermeables, algunos le pueden otorgar a la madera una protección considerable frente a los agentes atmosféricos. Estos no afectan la cantidad de humedad dentro de la madera por lo que la magnitud final de la contracción no se ve afectada. Sin embargo, su principal efecto es retardar la absorción de humedad y por consiguiente retardar la contracción o el hinchamiento de la madera.

Además de su aplicación en la superficie, también pueden ser aplicados en el interior de la madera (En las cavidades y paredes celulares). A estos suele agregársele otros químicos con fines repelentes y de teñir la madera.

En general, la efectividad de estos productos decrece con el tiempo, sobre todo cuando la madera está expuesta al clima; esto es debido a la ruptura de la continuidad de la capa de revestimiento y la consiguiente erosión de la madera que está debajo de la misma.

3. Tratamientos volumétricos: La contracción de la madera puede ser parcial o totalmente eliminada si se mantiene la misma en un constante estado de hinchamiento. Esto se puede lograr mediante la adición de diversas sustancias químicas (Cómo sales, azúcares, resinas, etc.) que se depositan en las paredes celulares.

4. Reducción de la higroscopia: La capacidad de absorción de agua y por consiguiente su contracción, pueden ser modificadas mediante tratamientos térmicos, la sustitución de hidroxilos por sustancias de menor higroscopia o la reticulación de los mismos. El efecto de altas temperaturas produce la descomposición de la hemicelulosa, lo que reduce considerablemente la magnitud de la contracción pero también la resistencia de la madera. La sustitución de hidroxilos suele tener un efecto mayor en la reducción de la contracción pero la madera se debe conservar en un estado de hinchamiento parcial. La reticulación de hidroxilos reduce aún más la contracción pero se reduce considerablemente la resistencia de la misma debido principalmente a la hidrólisis entre la celulosa que tiene lugar gracias a los compuestos utilizados para lograr dicho fenómeno. Cabe destacar también que estos dos últimos tratamientos son muy costosos.

En conclusión, los métodos utilizados para el control de la contracción e hinchamiento se encuentran aún en una fase

experimental o son de costo elevado por lo que su uso práctico no está muy difundido. Por esto es que el mejor método para manipular la madera es mediante un secado controlado dado que la mayoría de los problemas de este tipo son causados en maderas con un alto contenido de humedad inicial.

II.4 – *Propiedades mecánicas*

Las propiedades mecánicas de la madera son una medida de su resistencia a fuerza externas que tienden a deformarla. La resistencia de la madera a dichas fuerzas depende de la cantidad y la manera de ser aplicada. A diferencia de los metales y otros materiales de estructura homogénea, la madera presenta diferentes propiedades mecánicas dependiendo de la dirección que la fuerza es aplicada.

Conceptos básicos

La fuerza es cualquier acción que tiende a mover un cuerpo que se encuentra en reposo, cambiar su velocidad o deformarlo. Bajo la acción de fuerzas exteriores que tienden a deformar un cuerpo, este ejerce una cierta resistencia, dicha resistencia es conocida como tenacidad. La fuerza o carga es expresada en Newton o libras. La fuerza por unidad de área es conocida como tensión, que se expresa en Pascal o N/mm^2 y es dada por la siguiente relación: $T = \frac{F}{A}$ donde T es la tensión, F la fuerza aplicada y A es el área sobre la que es aplicada ésta.

Existen tres tipos básicos de tensiones: tracción, compresión, y de corte. Un cuerpo sometido a tracción, tiende a incrementar su largo; y si las fuerzas actúan en la dirección opuesta, se está frente a tensiones de compresión, que tienden a reducir el largo de la pieza. Las tensiones de corte se desarrollan cuando las fuerzas tienden a causar un desplazamiento entre las distintas partes adyacentes del cuerpo.

Bajo la influencia de fuerzas exteriores que generan las tensiones ya mencionadas, el cuerpo tiende a cambiar de forma y tamaño. Este cambio es conocido como deformación. Bajo tracción o compresión, la deformación es medida en milímetros y se distingue entre la deformación total y la deformación por unidad de longitud.

En diversos materiales, entre ellos la madera, la relación entre la tensión aplicada y la deformación es lineal para tensiones pequeñas, es decir que hasta cierto punto se cumple la ley de Hooke. Este punto es llamado límite elástico, por encima del mismo, un incremento de la tensión aplicada causa una deformación mayor a la deformación proporcional hasta que el material falla.

La elasticidad es la propiedad que posee un cuerpo para volver a su condición inicial (forma y tamaño inicial) cuando la carga causante de la deformación correspondiente deja de actuar sobre él, pero si esta sobrepasa el límite elástico parte de la deformación es permanente.

La relación entre la tensión y la deformación unitaria define el módulo de elasticidad (módulo de Young) y se calcula de la siguiente manera: $E = \frac{S}{d}$ donde E es el módulo de elasticidad (N/mm²); S es la tensión (N/mm²); d es la deformación unitaria (mm/mm). El módulo de Young es sólo válido hasta el límite elástico.

Un alto módulo de elasticidad indica un cuerpo más rígido, es decir, un cuerpo que soporta grandes tensiones, sin presentar gran deformación. En el caso de la madera el módulo de elasticidad se determina cargando la pieza por flexión o en dirección axial.

En oposición al concepto de elasticidad, se define la plasticidad. Un cuerpo perfectamente plástico es aquel que permanece completamente deformado una vez retirada la carga. Tanto el cuerpo elástico como plástico ideal, sólo existen en la teoría.

Resistencia a tracción

La madera presenta diferente resistencia cuando se le aplica tensión dependiendo de la dirección en la que la misma es aplicada. La resistencia en dirección axial es mucho mayor a la de la transversal, siendo la primera hasta 50 veces mayor. Dentro de la dirección transversal, no hay diferencias notables entre la radial y la tangencial.

Los valores típicos de resistencia en la dirección axial varían desde 50 a 160 N/mm² (MPa), mientras que si la tensión es aplicada en la dirección transversal, la resistencia toma valores entre 1 y 7 N/mm² (MPa). En ciertas especies estos valores varían por la presencia de celulosa, lignina, y otros extractivos.

Se ha observado que el largo de las células está relacionado con la resistencia en la dirección axial, en este sentido las maderas con células más largas tienden a poseer mayor resistencia en esta dirección. Esto se puede atribuir a la relación entre el largo celular y la forma en la que se ordenan las fibras. Dentro de una misma especie, el ángulo entre las microfibras es más pequeño cuando las células son más largas.

Los valores mencionados anteriormente en resistencia axial, hacen que la madera sea, sobre todo en los valores más altos, comparada de forma favorable con algunos metales u otros materiales.

Estas comparaciones son aun más favorables, si tenemos en cuenta la resistencia en relación al peso, ya que tenemos un material muy liviano en comparación a la resistencia a la que es capaz de ser sometido.

A pesar de todas estas características, la alta resistencia axial de la madera es raramente utilizada. Esto es debido al desarrollo de tensiones de corte además de las axiales; estas tensiones son considerablemente bajas (entre el 6% y el 10% de las axiales). A esto se le suma el hecho que la resistencia axial se ve reducida por la presencia de nudos u otras anomalías en el crecimiento.

El desarrollo de tensiones transversales es cuidadosamente evitado en estructuras de madera, ya que la resistencia de la madera cargada de esa forma es considerablemente menor. Además se deben de tener en cuenta la formación de grietas a causa de la contracción e hinchamiento que pueden reducir la resistencia prácticamente a cero.

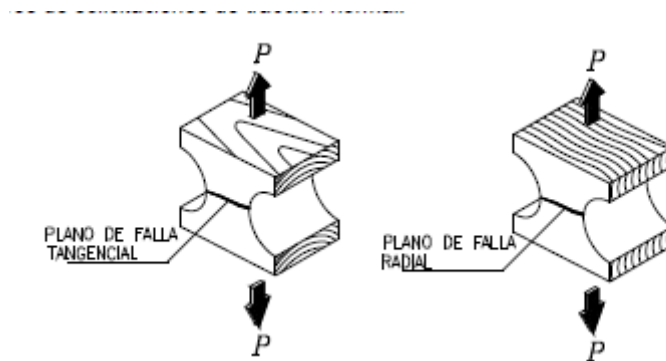


Figura 15 – Ensayo a tracción

Resistencia a compresión

La resistencia a compresión también presenta diferentes valores, dependiendo si es aplicada en dirección paralela o perpendicular al grano. En la dirección axial es considerablemente mayor (hasta 15 veces aproximadamente) que en la dirección transversal. Para los valores normales en la dirección axial varía entre 25 N/mm^2 y 95 N/mm^2 , mientras que la transversal varía entre 1 N/mm^2 y 20 N/mm^2 . Se ha observado que en las coníferas la resistencia a compresión en la dirección tangencial es mayor que la radial. En las latifoliadas la situación cambia y se invierte.

La resistencia de la madera a compresión axial, es menor en comparación a los metales, pero mayor comparándola a otros materiales de construcción como por ejemplo el ladrillo. También, la madera difiere de otros materiales en el hecho que su resistencia a la compresión es aproximadamente el 50% de la resistencia a tracción. Esta diferencia, se debe principalmente a la estructura de la madera que está compuesta por cadenas

de celulosa que le imparten una alta resistencia a la tracción axial. Los demás componentes, como la hemicelulosa y la lignina contribuyen a la resistencia a compresión.

La falla producida en la madera, debida a la compresión axial se tribuye a la ruptura de las capas intercelulares, plegado de células o ruptura de las paredes de las mismas, donde la presencia de puntuaciones produce disminución de la resistencia a compresión. Por el contrario, las tensiones que producen compresión transversal generan cambios en la forma de las células y reducción de las cavidades entre las mismas; al incrementar dichas tensiones, estos cambios avanzan gradualmente desde las superficies al interior de la madera.

Las tensiones de compresión transversal se forman por ejemplo en los durmientes de las vías de los trenes; mientras que en la dirección axial, se da en columnas. Cuando se utilizan para este último fin, existen especies que anuncian mediante un sonido, cuando están próximas a quebrarse.

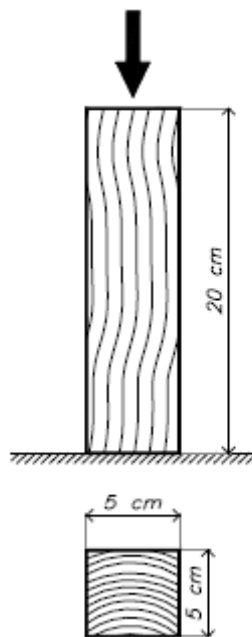


Figura 16 – Ensayo a compresión

Resistencia de cizalla

La cizalla (o corte) se puede presentar en dirección axial o transversal. Las tensiones de cizalla axial se presentan cuando la madera es cargada a flexión y su magnitud varía entre 5 N/mm^2 y 20 N/mm^2 . La resistencia al corte transversal es aproximadamente de 3 a 4 veces que en

la axial, pero esto no es de importancia práctica, ya que la madera siempre falla antes en la dirección axial.

La resistencia de la madera a la cizalla axial, es la de mayor importancia en lo que a fines prácticos respecta. Esto se debe tener en cuenta cuando estamos hablando acerca de la laminación de la madera, dado que cuando se carga en esta dirección, falla de esa forma.

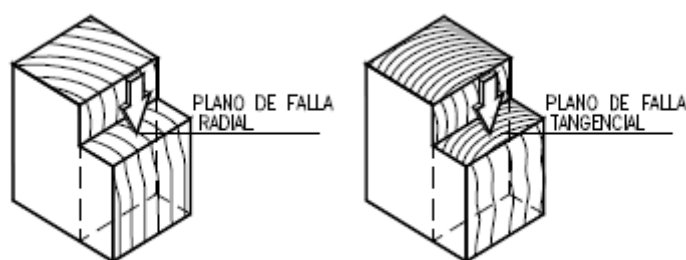


Figura 17 – Ensayo de cizalla

Resistencia a flexión

La resistencia a la flexión estática, es también una importante propiedad de la madera, dado que la mayoría de las estructuras están sometidas a este tipo de flexión. El caso más típico, es cuando la flexión sucede en la dirección transversal. En esta circunstancia se desarrollan tres tipos de tensiones: tracción, compresión y cizalla; las cuales son todas axiales.

La tracción tiende a alargar la fibra de la madera, y a compresión tiende a encogerlas y la cizalla tiende a desplazar la parte superior de la pieza sobre la inferior. En el caso habitual de una pieza simple, las tensiones de tracción y de compresión son mayores en la superficie inferior y superior, respectivamente. Estas disminuyen a medida que nos acercamos al centro de la pieza, y son cero en el plano neutral de la misma. Por el contrario, las tensiones de cizalla son mayores en el plano neutral y cero en la superficie. La distribución de tensiones a lo largo de la pieza, depende de la manera en la que esta es cargada (al centro, a los tercios, uniforme, etc.).

La resistencia de la madera a flexión es generalmente expresada por la carga de rotura, que indica la mayor tensión soportada por la pieza antes de romper. Este módulo oscila entre 55 N/mm^2 y 150 N/mm^2 , lo que muestra que posee un valor similar a la resistencia a la tracción en la dirección axial. Por esta razón, el módulo de ruptura puede ser usado como índice de dicha resistencia.

En comparación a los metales, la resistencia a la flexión es menor, pero mayor en comparación a la mayoría de los materiales no

metálicos. A esto se le suma que la madera ofrece como ventaja un bajo módulo de elasticidad y una relación más favorable de resistencia-peso.

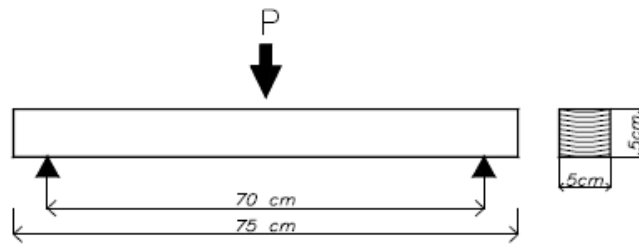


Figura 18 – Ensayo a flexión

Tenacidad

La tenacidad o energía en flexión dinámica hace referencia a la aplicación de cargas repentinas en contraste a los casos anteriores en donde las cargas eran estáticas o lentamente aplicadas. La energía absorbida por la madera es mayor en dichos impactos que en los casos anteriores; tal es el caso que una pieza de madera puede soportar aproximadamente el doble del caso cuasi estático. También se ha observado en el caso del impacto, la deflexión de la pieza es el orden de dos veces mayor que en el otro caso.

Elasticidad

Desde el punto de vista de la elasticidad, la madera se encuentra en una posición intermedia en relación a los demás materiales. Los valores de módulos de elasticidad oscilan entre 2500 y 17000 N/mm² (MPa). Se observa que la madera presenta menor módulo de elasticidad que los demás materiales utilizados en la construcción; aunque si se tiene en cuenta el peso de la misma, la madera es comparable con el acero. Como sucede con las demás propiedades mecánicas, el módulo de elasticidad varía según la dirección en la que la madera es cargada. Los valores indicados antes son los que refieren a la dirección axial, mientras que en la transversal dicho valor se encuentra entre 300 y 600 N/mm² (MPa). No existen notorias diferencias entre la dirección radial y la tangencial.

El módulo de elasticidad es determinado mediante ensayos de flexión dinámica o estática. En los primeros, el valor medido en general es algo más alto (en los segundos más bajo) que aquel que se obtiene cuando se mide mediante un ensayos de tracción dado que parte de la flexión deriva de tensiones de cizalla. Un método más preciso sería mediante ensayos de compresión pero el problema con estos es la gran dificultad práctica que poseen. Además de estos métodos, existe también la posibilidad de efectuar un ensayo en el cual se mide la vibración de la pieza de madera cuando pasa por ella una onda sonora determinada.

Dureza

La dureza es una medida de la resistencia de la madera a la penetración de cuerpos ajenos a la misma. Esta resistencia es mayor, casi el doble, en la dirección axial que en la transversal (de nuevo la diferencia entre la radial y la tangencial es prácticamente despreciable). La dureza también indica la resistencia a la abrasión y al rayado de la superficie de la madera; esto es particularmente importante dado que es un índice de cuan trabajable es la madera con herramientas.

Factores que afectan las Propiedades Mecánicas

La madera tiene una compleja estructura natural diseñada para servir las necesidades funcionales de una planta en vida. No siempre resulta evidente por qué las probetas de una especie maderera determinada, extraídas de diferentes árboles o de un mismo árbol muestran una pronunciada diferencia en su densidad y en su resistencia. La variabilidad entre árboles y de la misma especie responde a diferencia genéticas, de ambiente o de ambas. En un mismo árbol el crecimiento es irregular. Existe además, diferencias en las propiedades mecánicas, debido al tratamiento de la madera durante su elaboración. Los factores que inciden sobre la variabilidad de las propiedades mecánicas son:

1. Defectos: Estos son cualquier irregularidad física o química de la madera, que afecta su aspecto, resistencia o durabilidad, determinando generalmente, una limitación en su uso o aplicación. Los defectos que mayormente inciden sobre las propiedades mecánicas o resistentes de la madera son: Nudos, grietas, granos o fibra desviada, pudrición, etc. Otros defectos que inciden en la resistencia, pero, en menor grado, son: Bolsas de corteza o resina, acebolladuras, alabeos, médula y canto muerto. Debido a lo anterior es que la determinación de las propiedades mecánicas se realiza en probetas libres de defectos.

2. Densidad: Aparte de los ensayos de resistencia, la densidad o peso específico de una pieza de madera, es el criterio más satisfactorio para determinar su resistencia. Las células que constituyen finalmente la madera, están ligadas por la lignina. La pared celular está compuesta principalmente por celulosa, encontrándose además hemicelulosa y lignina. Las diferencias de composición, entre especies y dentro de ellas, es la primera causa de la variación de la densidad. El grosor de las paredes celulares y el tamaño de las porosidades también es variable, añadiendo una nueva causa de variabilidad. La densidad de la madera varía aún dentro del mismo árbol.

3. Contenido de humedad: Cuando la madera pierde agua bajo el Punto de Saturación de la Fibra (PSF), cada célula se compacta cada vez más. Debido a ello las fibras se ponen más rígidas y fuertes, resultando de lo anterior que una pérdida del contenido de humedad de la madera, va acompañada de un incremento de la resistencia. Por sobre el PSF, un aumento del contenido de la humedad no tiene efectos sobre la resistencia.

4. Temperatura: En general las propiedades mecánicas de la madera decrecen cuando ella se calienta y aumenta cuando la madera se enfría. La relación entre la resistencia de la madera y la temperatura de exposición es aproximadamente lineal siempre que su contenido de humedad permanezca constante y las temperaturas sean inferiores a 150° C. Los efectos de la temperatura sobre la resistencia y propiedades elásticas de la madera pueden clasificarse como temporales y permanentes. Efectos temporales son aquellos que existen sólo a una temperatura en particular y son independientes del período de exposición y los efectos permanentes son aquellos que permanecen después que la madera ha sido llevada a la temperatura normal (20° C) y dependen de la duración de la exposición más que del valor de temperatura involucrado.

5. Albura y Duramen: Numerosas experiencias han demostrado que, en general no existe diferencia significativa entre las propiedades mecánicas de madera de albura y duramen. Existen sí, algunas excepciones a esta regla, las cuales dependen fundamentalmente de la densidad de ambas zonas y de los defectos que prevalecen en ellas.

6. Temporada de Corte: Existe la creencia que la temperatura de corte, influye sobre las propiedades de una especie maderera. Se asigna, a la madera cortada en invierno, ciertas ventajas sobre la que se corta en otra estación: Mayor durabilidad, mejor color y aún una mayor resistencia. Esta creencia no está respaldada por investigación alguna creada con este fin. Lo que se reconoce es que las condiciones climáticas a que puede quedar expuesta la troza, una vez cortada, son distintas y ellas tienen influencia sobre la madera que se obtiene. Si el árbol se tala en cualquier estación o temporada y se procesa inmediatamente después del corte, procediendo posteriormente a un secado en horno, con un método estandarizado, la madera que así se obtiene no tiene diferencias en sus distintas propiedades, derivada de la temporada de corte.

7. Tratamiento de la Madera: Numerosas investigaciones afirman, que los efectos de los tratamientos de la madera, sobre la resistencia de ella, se deben principalmente al método de aplicación del preservador y no a las sales de impregnación usadas. El debilitamiento que se origina en la resistencia se debe a las altas temperaturas y presiones inherentes a algunos procesos de

tratamientos, a fin de obtener una satisfactoria impregnación. Esto es particularmente crítico cuando se usa prolongados periodos de alta temperatura, con grandes presiones, en maderas refractarias o difíciles de impregnar. Sin embargo, es posible usar temperaturas y periodos de aplicación moderada, usando técnicas complementarias al proceso de impregnación.

Ensayos

a) Determinación de la dureza estática (Norma UNIT 364:2008): Para la realización de este ensayo, se debe conectar a la máquina un dispositivo que posee una esfera de acero de 5,64 mm de radio, la cual se hace penetrar a una probeta normalizada (sección 50 x 50mm y largo no menor a 50mm). Luego, con los datos obtenidos aplicamos la fórmula: $H = K.P$ donde “H” es la dureza estática, “K” es coeficiente (igual a 1 para un embolo de 5.64 mm) y “P” es la carga, en Newton. Esto se hace para cada una de las direcciones de la probeta.

b) Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra: Es la resistencia de la madera a una carga en dirección paralela a las fibras, la que se realiza en columnas cortas para determinar la tensión de rotura: tensión en el límite de proporcionalidad y módulo de elasticidad.

c) Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano (Norma UNIT-ISO 3132:1975): Se utiliza una probeta normalizada (sección 20 x 20mm y 30 a 60mm de largo) en el ensayo, y se le aplica una compresión de forma tal que esta sea perpendicular al grano de la madera. Luego, con los datos obtenidos, hacemos la compresión utilizando la fórmula: $\sigma_c = P/A$ donde σ_c es tensión a compresión en MPa, P es la carga en compresión (límite proporcional) y A es el área de la probeta.

d) Determinación de los módulos de elasticidad y rotura en ensayo de flexión estática en maderas (Norma UNIT 1137:2007): Para este ensayo se requieren probetas normalizadas (ancho 25 ± 2 mm y 25 ± 2 mm de alto, ó 20 ± 2 mm de ancho y 20 ± 2 mm de alto) con un largo de 14 veces la altura de las mismas, una máquina de ensayo para flexión con dispositivo para regular la velocidad de ensayo, y un elemento para medir la deformación de la probeta.

El método consiste en aplicar una carga continua, a velocidad constante, en la mitad de la probeta, midiendo las deformaciones producidas por la aplicación de dicha carga hasta llegar al punto de rotura.

II.5 - Degradación de la Madera

Agentes Destructores de la Madera

La desintegración de la madera puede ser producida por diferentes causas y es importante conocer, en cada caso, el principal agente causal de la destrucción para elegir el modo de protección más adecuado.

El desgaste mecánico y la descomposición por acción de los agentes químicos, por ejemplo, exigen la renovación de la madera mucho antes que se presenten en ella síntomas de pudrición. Por esto se considera pertinente exponer primero una visión de conjunto de las causas que directa o indirectamente intervienen en la destrucción de la madera. Ellas pueden dividirse en dos grandes grupos: causas biológicas y causas externas. Ambas causas pueden actuar sobre los árboles en pie o recién volteados, o bien sobre la madera aserrada o de aquella puesta en servicio.

Entre las causas biológicas, por ejemplo, hay algunos hongos e insectos que pueden invadir la madera en cualquier forma o estado en que se encuentre.

Además, se pueden mencionar los animales destructores marinos, que solamente atacan la madera sumergida en el mar o en aguas saladas. Por el contrario, entre las causas externas figuran las tormentas (huracanes y rayos), inundaciones y aludes que provocan daño especialmente en los árboles en pie, mientras que la radiación solar, los agentes atmosféricos y otros factores de orden físico-químico contribuyen especialmente a la desintegración de la madera aserrada o puesta en servicio.

Los agentes destructores biológicos necesitan, para iniciar su desarrollo en la madera, de ciertas condiciones primarias de subsistencia, que son: 1. Una fuente de material alimenticio para obtener su nutrición.

2. Una temperatura adecuada para su crecimiento.

3. Una adecuada humedad para su desarrollo.

4. Una fuente de oxígeno suficiente para la respiración

5. La presencia de una infección, en forma de esporas, que actuará como una semilla o germen de la cual el hongo puede desarrollarse.

El crecimiento de estos hongos y su desarrollo, sólo podrá efectuarse si cada una de estas condiciones se cumplen. Al existir estas condiciones básicas el ataque biológico puede producir alteraciones de importancia en la resistencia mecánica de la madera o en su aspecto exterior.

a) Organismos vegetales y xilófagos que degradan la madera: 1. Hongos cromógenos: Estos suelen alimentarse de los compuestos orgánicos fácilmente digeribles, almacenados en la madera; causan coloración que pueden clasificarse como defectos y ejercen escasa o nula influencia sobre las propiedades de la madera. No destruyen la madera, pero influyen en su predisposición para ser atacada por hongos de pudrición. Producen un cambio de color original, tomando un color azulado en la albura. El material afectado no pierde resistencia.

2. Hongos de pudrición: Este grupo es el más importante y abarca los hongos que son capaces de desintegrar las paredes de la célula y, por lo tanto cambian las características físicas y químicas de la madera. Tal desorganización de la materia da lugar al estado llamado “pudrición”.

Se reconocen dos tipos de pudrición:

I- Pudrición Blanca: Producida por hongos que atacan la lignina, dejando un residuo blanquecino.

II- Pudrición Parda: Generada por el ataque de la celulosa dejando un residuo pardusco.

3. Bacterias que descomponen la celulosa: La intervención de las bacterias, en la destrucción de la madera, es poco conocida debido a que tiene escasa importancia, si se compara con la de los hongos. Su acción se explica, lo mismo que en el caso de los hongos, por la actividad enzimática.

Aunque las bacterias segregan enzimas distintas a la de los hongos, no hay diferencia esencial entre los efectos de ambos microorganismos sobre la madera. Puede decirse que las bacterias que disuelven la celulosa no desempeñan, en general, un papel importante en la destrucción de la madera puesta en servicio; pero es innegable que la velocidad de pudrición puede ser aumentada por la presencia de estos organismos.

4. Mohos: Pueden desarrollarse en la madera, produciendo proliferaciones algodonosas sobre la superficie. El comienzo y extensión de estos hongos dependen de temperaturas favorables y de la existencia de una abundante humedad. El moho es perjudicial por el aspecto que comunica al material infectado.

El moho de la superficie puede cepillarse y quitarse de la madera y el hongo causante no parece afectar a la resistencia y otras propiedades importantes, en grado considerable. Siempre existe la posibilidad de que la madera enmohecida esté atacada por la pudrición, pues, las condiciones que

facilitan el crecimiento de los mohos, estimulan el desarrollo de los hongos de pudrición.

b) Animales Xilófagos: 1. Insectos: Los insectos xilófagos atacan a los árboles en pie o recién talados, a la madera en chips o aserrada y a la madera puesta en servicio. El daño producido por los insectos es debido, en general, a sus larvas y orugas, que penetran en la madera para buscar alimento y protección, abriendo en ella galerías de características especiales. A veces, sin embargo, las formas adultas toman parte activa en la destrucción, de lo cual pueden servir de ejemplo: las Termitas subterráneas, cuyas obreras son las agentes causales del daño. Las galerías producidas por los insectos no solamente afectan al aspecto de la madera, sino que, interrumpiendo la continuidad de sus fibras, reducen la resistencia mecánica de la pieza de madera invadida.

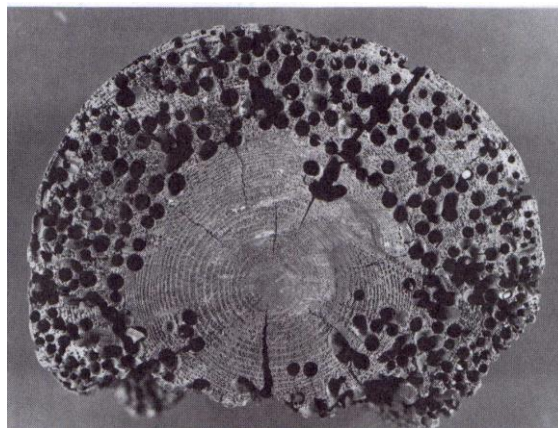


Figura 19 - Madera deteriorada por termitas

Los insectos xilófagos pueden dividirse en dos grupos: I- Insectos que atacan la madera antes de ser puesta en obra: Sus daños son, en general, muy visibles en el momento del podado del árbol y al hacer su trozado y despiece. Por lo cual cuando un grupo de madera se clasifica por calidades, las piezas que presentan galerías de insectos pueden ser rechazadas, según el carácter e intensidad de uso a que se destina la madera.

II- Insectos que atacan la madera una vez puesta en servicio: Este grupo es con gran diferencia, el más importante en la industria de preservación de la madera, no solo porque gran parte del daño puede ser evitado mediante un tratamiento adecuado con antisépticos, sino también porque la sustitución de la madera inutilizada de una estructura supone trabajo y gastos que sobrepasan con frecuencia al costo de adquisición de las nuevas piezas de madera.

Los insectos lignívoros, que causan mayor daño en las maderas taladas y a las puestas en obra, comprenden: a) Termitas: Tales como termitas subterráneas, termitas de madera seca y termitas de madera húmeda.

b) Coleópteros: Tales como los insectos que exigen un alto contenido de humedad en la madera ($H > 20\%$) por lo cual sólo atacan ordinariamente a los árboles en pie o recién volteados, los insectos que atacan sólo maderas parcialmente secas ($H < 18\%$) o recientemente secas, limitando su daño a la albura, e insectos que atacan únicamente a las maderas viejas y muy secas, por ejemplo: la carcoma.

c) Moluscos: Causan gran daño en los astilleros, embarcaderos, muelles y otras estructuras fijas o flotantes, incluyendo embarcaciones, balsas, etc. Establecidas en el mar o agua salobre. Existen tres géneros importantes de moluscos perforadoras marinos de la madera: el Teredo, el Bankia y el Martesia. Los dos primeros comprenden una serie de especies de forma bastante parecida a un gusano y muy similares en sus defectos sobre la madera y en otras características. En cambio, las perforadoras del género Martesia se parecen a las almejas y se diferencian en varios aspectos de los otros dos géneros de perforadoras.

d) Crustáceos: Los crustáceos perforadoras de la madera se diferencian de los moluscos en su modo de ataque y destrucción de la madera, así como en su estructura y aspecto general. A diferencia de los moluscos, estas perforadoras no quedan aprisionadas en la madera sino que gozan de amplio movimiento, especialmente en las fases adultas de su desarrollo. Jóvenes y adultos horadan la madera y hacen estrechas galerías que pocas veces se extienden hasta muy lejos de la superficie. Aunque estos trabajos son más o menos superficiales, los animales atacan la madera en tal número, que la capa externa de la madera infectada queda completamente acribillada en los puntos de ataque. Las delgadas separaciones de las galerías se rompen fácilmente por la acción mecánica de las aguas y los objetos flotantes, y así una nueva superficie se ofrece a las perforadoras. La destrucción va haciéndose progresivamente más profunda y el volumen de madera queda tan reducido en un nivel determinado que la pieza es incapaz de soportar el peso impuesto. El daño causado por estos perforadoras es menos espectacular y grave que el causado por los moluscos, no sólo porque es más visible a la inspección, sino también porque la destrucción de la madera es menos rápida.

En condiciones muy favorables, los crustáceos necesitan un año al menos para utilizar un pilote de 35 mm de diámetro mientras que los moluscos pueden hacerlo en unos seis meses.

c) Acción del Hombre: 1. Desgaste mecánico: La madera sometida a condiciones de movimientos de diversas clases, está expuesta al deterioro por desgaste mecánico o por roce. Es el caso de traviesa, Tablas de pasos a nivel, bloques de madera usados en el pavimento de las calles, puentes y suelos de fábricas, andenes, canales de relave, etc. En algunos de estos usos la madera puede hacerse inservible sólo por el desgaste mecánico, pero la mayoría de las veces, la pudrición se combina con el roce para causar el deterioro.

2. Calor y frío producido artificialmente: La madera experimenta variaciones en su composición y estructura cuando se somete a altas temperaturas, durante extensos períodos de tiempo incluso muy por debajo de 120° C en que empieza la destilación se observan ya alteraciones que se van intensificando a medida que aumenta el tiempo de exposición. Aunque la naturaleza de estas alteraciones no está completamente dilucida, se puede suponer que obedecen a que el calor prolongado origina un acortamiento de las cadenas de celulosa, a causa del cual la madera se hace quebradiza.

El frío no daña a la madera seca, pero si es muy intenso, las fibras leñosas se hacen quebradizas como el cristal y pierden su elasticidad. En la madera húmeda, el hielo y deshielo reiterado del agua que contiene, ocasiona la rotura de las paredes celulares.

3. Agentes químicos incluyendo el agua: En los edificios, la cal apagada, en estado fresco, puede ejercer efectos corrosivos si está en contacto con la madera durante mucho tiempo. Los colores ácidos empleados para teñir los entarimados pueden ocasionar en ellos una corrosión importante debido a la hidrólisis de los hidratos de carbono, que contiene la madera.

La naturaleza química de la destrucción puede ser reconocida fácilmente, en la mayoría de los casos, por un simple análisis del extracto acuoso de la madera descompuesta, si el pH de este extracto cae del lado básico, o da una acidez mayor que 2,5 no es probable que la destrucción sea originada por hongos y debe investigarse el agente químico que la produce.

La exposición prolongada de la madera al agua corriente, especialmente si está caliente, como en las torres de enfriamiento, puede producir en ella una erosión superficial, debido al deslavado de las partes más solubles y a la acción de desgaste del agua corriente sobre la madera.

En cuanto a la madera navegada por los ríos, o empleada en construcciones sumergida parcial o totalmente en el agua, hay opiniones contradictorias; unos creen que con ello se pierden los taninos, resinas y otras sustancias que desempeñan un cierto papel en la conservación de la madera, y

otros, en cambio, estiman que esta pérdida de sustancia aumenta la duración de la madera, porque elimina algunas materias que favorecen la pudrición. El lavado de las sustancias tales como taninos, etc., debido al agua dulce, disminuye la higroscopicidad por lo cual los fenómenos de contracción e hinchamientos son menos acusados en la madera lavada, que en la no sometida a este tratamiento.

4. Fuego: Ningún material puede soportar indefinidamente la acción del fuego sin deteriorarse. En el caso de los edificios de madera se ha encontrado que las vigas de grandes secciones transversales sólo muestran una superficie carbonizada, de pequeña profundidad, que cubre y protege madera afectada por el fuego. La explicación de lo anterior es la baja conductibilidad térmica de la madera, a causa de lo cual se trasmite una pequeña proporción del calor hacia el interior de ella. En muchos casos, este calor es insuficiente para liberar gases inflamables, que son los que promueven el avance del fuego.

La inflamabilidad de la madera es el mayor obstáculo que se opone a la difusión de su empleo en la construcción, en competencia con materiales no inflamables. En efecto, una propaganda desmesurada y tendenciosa sobre “el riesgo de incendio” de las construcciones en madera, en provecho de otros materiales, ha conducido a adoptar una actitud injustificada contra el uso de madera en los edificios. La experiencia ha demostrado que el uso de materiales no combustibles no preserva los edificios de ser dañados e incluso destruidos por el fuego.

El combustible para la iniciación y extensión de un incendio lo proporcionan casi siempre, otros materiales mucho más inflamables que la madera. La presencia de cortinas, muebles y otros objetos inflamables, en combinación con determinados factores tales como defectos de construcción, descuido ignorancia de la gente y falta de medios para extinguir rápidamente las primeras llamas, constituyen riesgos de incendio más importante que las construcciones en madera.

I- Comportamiento de la madera frente a la acción del fuego: Las diferentes etapas que se suceden en un elemento de madera expuesto a la acción del fuego son: Inflamación, Esparcido de la llama y penetración del fuego en la madera.

a) Inflamación: Es la tendencia a iniciar el quemado con o sin la presencia de llama. Cuando la madera se somete a la acción del calor, su temperatura se eleva rápidamente hasta 100° C. En este punto se producen grietas debido a la evaporación del agua que la madera contiene.

Cuando toda la humedad se ha ido, la temperatura nuevamente se eleva lentamente, se produce un cambio químico y la madera

empieza a desintegrarse. Bajo los 200°C, sólo es visible un leve oscurecimiento de la superficie, pero, entre 200°C y 300°C, la descomposición se torna rápida, produciendo gases inflamables y alquitrán, dejando carbón detrás de sí. El encendido de estos gases produce la inflamación de la madera.

La facilidad con que puede inflamarse una madera dependerá de la temperatura de la fuente del calor, de la especie maderera, del contenido de humedad, de la duración de la exposición, del tamaño y de los detalles constructivos.

b) Esparcido de la llama: Es la tendencia de la llama a propagarse por sobre la madera. De la velocidad de esparcido de la llama depende la posibilidad de tener tiempo para extinguir el fuego o para evacuar un edificio. El esparcido de la llama se mide observando, mediante instrumentos adecuados, el deslizamiento o incremento de avance de una llama sobre la superficie de un elemento constructivo tal como muro, cielos, vigas, etc.

El incremento del esparcido de la llama puede variar considerablemente, dependiendo esto de la posición de los materiales combustibles, de la forma de aplicación del calor y la llama y de otras características externas (viento, ventilación, etc.).

c) Penetración del fuego: Es el avance de la combustión desde el exterior hacia el interior de una sección transversal de un material. En la madera, el avance o penetración hacia el interior tiene una velocidad que varía entre 0,8 mm/min a 0,5 mm/min. El calor penetra, lentamente, a través de la capa de carbón exterior. La temperatura, a 6 mm hacia el interior, es de sólo 175° C. Como resultado de lo anterior, el avance del quemado se torna aún más lento, por falta de una temperatura adecuada y la sección transversal, no afectada por el fuego, sigue aportando resistencia al elemento. Este comportamiento se conoce como “resistencia al fuego de la madera”.

Los tiempos necesarios para alcanzar la falla o rotura del elemento (15% de su resistencia inicial) son:

Material	Tiempo de falla (min)
Aleación de aluminio	4
Acero dulce	9,5

Vigas de madera de 25 * 50 mm	13,5
Tirante de madera de 25 *50 mm	14,5
Viga de madera de 50 *100 mm	24,5
Tirante de madera de 50 * 125 mm	26,5

Tabla... Tiempo de falla de los materiales

Durabilidad Natural De La Madera

Algunas especies de madera presentan una mayor resistencia al ataque de agentes destructores, en especial a los hongos xilófagos, debido a que contienen sustancias extractivas: aceites esenciales, taninos, fenoles; los cuales realizan cierta preservación natural.

La durabilidad depende no sólo de las especies, sino del medio ambiente en que se desarrollan, del tipo de hongo o insecto que ataca y de las condiciones ambientales de donde se ubica la madera.

Las maderas muy durables se pueden utilizar con confianza para estructuras en permanente contacto con el agua o el suelo ejemplo: pilotes de muelles, durmientes, postes para cercos, etc.

a) Principios Básicos: Se define por durabilidad natural a la capacidad que posee la madera para resistir el ataque de los diferentes agentes biológicos de destrucción. Una vez que se pone en servicio sin ningún tipo de tratamiento de preservación.

b) Clasificación de las Maderas: Para clasificar las categorías de durabilidad natural de las maderas comerciales, se deben aceptar las normas de ensayos de laboratorios reconocidos por la autoridad competente.

Esta es una clasificación de dureza provisoria por lo tanto susceptible de ser modificada.

CATEGORÍA	MADERA (Nombre Común)
MUY DURABLE	Roble – Ciprés – Alerce

DURABLE	Raulí – Lenga – Lingue
MODERADAMENTE DURABLES	Canelo – Coigüe –Tineo – Ulmo
POCO DURABLES	Araucaria – Eucalipto –Laurel – Mañio
NO DURABLES	Alamo – Olivillo – Pino radiata - Tapa

Tabla... Niveles de dureza.

III – PROCESAMIENTO

III.1 - Secado

La madera contiene una cantidad considerable de humedad inmediatamente después de ser cortada por lo cual debe ser secada. Irregularidades en este proceso pueden ocasionar defectos en la madera y si la humedad no es extraída se la expone al ataque de agentes bióticos. Así mismo, el secado tiene otras ventajas como ser la reducción de peso lo que conlleva a una disminución en los costos de transporte, el aumento de la resistencia mecánica y la capacidad de ser clavada, la posibilidad de ser pintada o terminada con tratamientos especiales entre otros.

Factores de secado

Los principales factores que afectan el secado son el calor que se le irradia a la madera, la humedad relativa y la circulación de aire. El calor es el necesario para evaporar la humedad; mientras más alta sea la temperatura del aire, más rápidamente se desplaza la humedad desde el interior a la superficie de la madera. La humedad relativa determina la capacidad de secado del aire; mientras más seco esté mayor capacidad de secado tiene debido a que puede almacenar más vapor de agua. La capacidad de secado también es afectada por la temperatura, un incremento de esta hace que la humedad ambiente se reduzca. Debido a esto es que controlando la humedad relativa se puede controlar cuán rápido se evapora la humedad y por consiguiente la magnitud de las tensiones que se generan en dicho proceso. La circulación de aire es necesaria para transportar el calor hacia la madera de forma uniforme.

Tipos de secado

La madera puede ser secada al aire o en horno. El secado al aire es realizado en espacios abiertos y raramente bajo cubierto mientras que el secado en horno requiere la creación de un espacio provisto de un clima artificial donde la temperatura, la humedad relativa y la circulación de aire son controladas mediante instrumentación especial. A pesar de esto, la madera secada al aire y la secada en horno no difieren en cuanto a la calidad del producto. Sin embargo, al secarse al aire se requiere más tiempo en el cual la madera puede ser atacada por agentes bióticos y no es posible su utilización en algunos productos debido al contenido de humedad final que este método le confiere a la madera. Por el contrario, el secado en horno es mucho más rápido, se puede llevar la madera al nivel de humedad que se quiera y no depende de las condiciones climáticas. La principal desventaja de este método es su costo notoriamente mayor la del anterior.

Secado al aire

El proceso comienza con la correcta selección del terreno donde se dispondrá la madera para ser secada. Este debe ser un lugar plano, aireado (No estar rodeado por edificios o relieve) y seco para evitar la propagación de vegetación y hongos. Luego, se debe considerar como serán apiladas las diferentes piezas de madera. Estas se colocan paralelas unas a las otras dejando entre ellas suficiente espacio para que se puedan manipular con facilidad, para que circule el aire correctamente y para que en caso de incendio este no se propague instantáneamente.

Con respecto a la orientación, se busca ubicarlas paralelas a la dirección norte-sur y a la dirección más habitual de los vientos. Es fundamental colocar las maderas bien paralelas para evitar que el aire que ingresa y aumenta su contenido de humedad debido a la evaporación, pueda circular con facilidad y continuar con el proceso. Este fenómeno también se puede dar cuando se realizan pilas muy altas, por esto es que en general se buscan relaciones altura-ancho de la pila del orden de 1:3.

Otros aspectos a tener en cuenta son las bases de apoyo de las pilas, los separadores que se colocan entre pilas contiguas y cubrimiento de la parte superior de la pila. Las bases deben ser hechas de maderas duras o de hormigón. Deben estar dispuestas de tal forma que se permita su movimiento y que la primera fila esté separada unos 30 centímetros del piso. La distancia entre las bases varía según la especie de madera a secar, menores distancias son recomendadas para maderas con tendencia a pandearse. Entre las pilas de madera se coloca cada una determinada cantidad de separadores para evitar el desarrollo de agentes bióticos. Estos están hechos de piezas prismáticas de madera, en general de 2.5 centímetros de lado, secadas al aire y sin defectos. La distancia de estos separadores afecta sobre todo la velocidad de secado y por consiguiente puede generar defectos en las piezas (Sobre todo pandeo). Menos separadores son utilizados en las coníferas debido a que estas toleran secados más rápidos, sin presentar defectos, que las latifoliadas. La cobertura superior de las pilas debe ser realizada para evitar el ataque directo del sol, la lluvia o la nieve. Estos techos son realizados con madera o metal y deben ser más largos que la totalidad de las pilas.

Un defecto que suele aparecer en el secado es la aparición de grietas en los extremos de las piezas. Esto es debido a la rápida evaporación de la humedad de los extremos mientras que el resto de la pieza sigue húmeda, pudiéndose evitar mediante la aplicación de productos químicos a la madera que retrasen dicha evaporación.

El tiempo de secado es otro factor que es determinante. Si bien varía entre especies, las coníferas tienden a secarse más rápido que las

latifoliadas. También varía dependiendo del ancho, siendo el tiempo de secado proporcional al cuadrado del mismo; de si se trata de duramen o de albura, teniendo esta última un secado más rápido y de la estación del año en la que se esté, el secado ocurre más rápido durante el verano.

El contenido de humedad debe ser controlado en todo momento para poder tomar medidas cuando este llegue a determinados niveles. En ciertos casos se debe acelerar o enlentecer la evaporación y cuando llega al nivel deseado de humedad, interrumpir el secado en pilas y almacenar la madera en lugares cubiertos sin separadores.

Secado en horno

Este tipo de secado es generalmente llevado a cabo en hornos de vapor equipados con instrumental para el control de la temperatura, humedad, circulación de aire y remoción del exceso de humedad del aire dentro del mismo. Es preferido antes que el secado al aire debido a la considerable reducción en el tiempo y a la posibilidad de controlar las distintas variables de forma más efectiva.

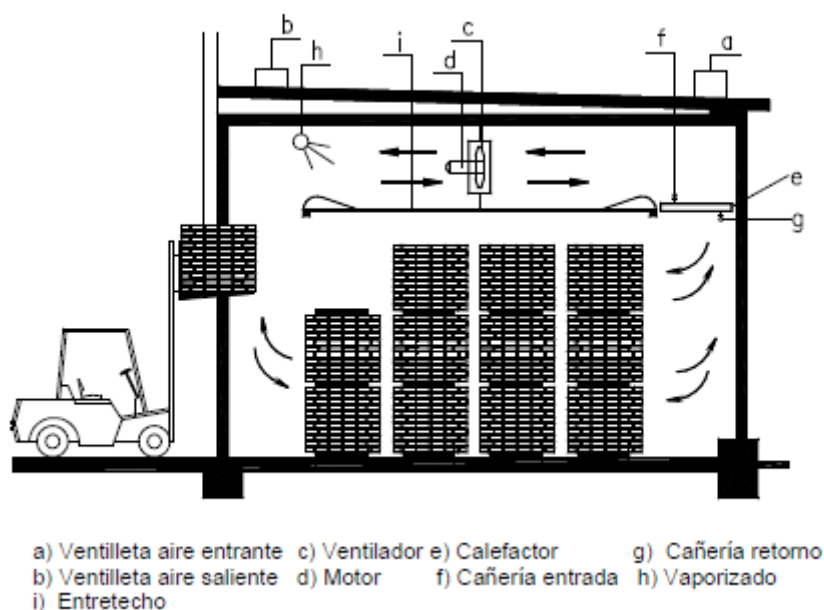


Figura 20 – Horno de secado

Existen básicamente dos tipos de hornos, los de compartimientos y los progresivos. En los primeros, las piezas de madera permanecen en la misma posición durante todo el proceso de secado mientras que las diferentes condiciones dentro del horno (temperatura, humedad, etc.) son modificadas en determinados intervalos de tiempo. En los de tipo progresivo, la madera es desplazada desde el inicio del horno hasta la salida. Las condiciones en este tipo de horno no son constantes en el largo del mismo;

por ejemplo, al principio son más suaves (baja temperatura y alta humedad) y progresivamente se vuelven más intensa (la temperatura aumenta y la humedad se reduce). Debido a esto, siempre hay pilas de madera que se encuentran en distintas etapas de secado. Este tipo de horno es el menos frecuente debido a que la posibilidad de control es limitada lo que resulta en un secado heterogéneo, solamente logrando la homogeneidad cuando las sucesivas pilas de madera poseen iguales cantidades de humedad.

Los hornos son generalmente construidos con ladrillos y hormigón aunque también en metales como el aluminio los cuales son prefabricados, móviles y de más rápido calentamiento. La mayoría de los hornos están provistos de aislación térmica, especialmente en la zona de la puerta donde se puede perder calor y vapor. La superficie interna del horno debe estar protegida contra agentes corrosivos que se pueden producir al secar determinados tipos de madera, especialmente aquellas que contienen grandes cantidades de extractivos. El tamaño puede variar dependiendo de su uso pero se debe tener en cuenta que a mayor tamaño se dificulta obtener la uniformidad y que la madera debe ocupar solamente un 60% del volumen total de horno.

El calor es introducido al horno mediante vapor el cual es transportado la interior mediante tuberías ubicadas debajo, sobre y entre las pilas de madera. La humedad relativa es controlada con la introducción de vapor y la circulación de aire ejecutada con ventiladores. Este control es realizado de forma manual o automática dependiendo de la tecnología que se disponga.

En cuanto al apilado a la hora del secado, los principios generales explicados anteriormente también son aplicables. Existen, sin embargo, ciertas características a tener especialmente en cuenta; como tener cuidado que las diferentes piezas de madera no sobresalgan de la pila, la correcta ubicación de los separadores y el agrupamiento en la misma pila de piezas con similar comportamiento al secado. Las condiciones de secado son más severas en el horno que al aire libre, por lo que el incorrecto apilado produciría deformaciones más importantes dentro de las cuales se destaca el pandeo.

Los cambios del contenido de humedad de las piezas deben ser controlados durante todo el proceso. Para esto se suele colocar una muestra de madera, que se considerará representativa de la pila, cerca del centro de la misma y a la cual se le determinará el contenido de humedad. En general se colocan seis de este tipo de muestras y en casos de secado más drástico se extraen de más de uno a la vez.

Las condiciones de temperatura y humedad relativa y su variación en el tiempo deben ser controladas mediante un cronograma de secado. Estos han sido determinados de forma empírica (mediante ensayo y error) con el objetivo de minimizar tanto el tiempo de secado como los defectos producidos durante el mismo. Todos los cronogramas son indicativos y deben ser adaptados para el uso específico que vaya a tener el producto final; de este modo es que existen cronogramas especiales para secado rápido, secado con la menor pérdida de resistencia, etc. El cronograma indica cuándo y cómo deben variar los valores de humedad y temperatura en función de cuán seca estén las piezas que se encuentran dentro del horno. Para realizar tales medidas desde es fundamental tomar los valores de humedad dentro de cada piezas. Con este fin es que se toman dos muestras de madera y se realizan probetas libres de defectos y lejanas al borde de la pieza para calcular su masa en relación a la masa conocida de dicha madera seca. Para evitar este proceso se suele utilizar cronogramas que especifican cuando cambiar las variables en función del tiempo que ha pasado. Este último método es claramente menos preciso y se aplica en madera de fácil secado (sobre todo coníferas). Cuando este proceso es realizado de forma totalmente automática (en aquellas maderas que lo permiten), el contenido de humedad es continuamente medido mediante electrodos colocados en las piezas dentro del horno que se basan en la variación de las propiedades eléctricas del material en función de su humedad.

Existen tres etapas bien diferenciadas en el proceso de secado: la preparatorio, el secado considerado en sí propio y la igualación de los contenidos de humedad. En el primero el objetivo es precalentar la madera, donde las temperaturas se encuentran entre 45° y 65° y la humedad cercana al 100% cuando la madera es colocada directamente en el horno y al 75% cuando esta fue secada al aire previamente. En la segunda etapa, el contenido de humedad de la madera ya comenzó a descender. Aquí, la temperatura del horno comienza a incrementarse progresivamente en función del contenido de humedad de las piezas. La tercera etapa comienza poco antes del final de secado (aproximadamente cuando la humedad de la madera se encuentra un 2% por encima de la deseada). En esta etapa las variaciones de temperatura y humedad se hacen de forma más suave, alcanzando la primera su máximo valor en esta etapa. Una vez finalizadas estas tres etapas, la madera se deja en el horno apagado hasta que la temperatura alcance unos 20°.

Otro aspecto a tener en cuenta en el secado en horno es la velocidad con la cual las piezas se van secando. Con este fin se determina el coeficiente de humedad que indica la relación entre la humedad del momento en que se quiere medir de la madera y la humedad de equilibrio de la misma. Un bajo coeficiente incrementa el tiempo de secado y lo vuelve no viable en el

aspecto económico; por el contrario uno alto, señala una gran diferencia entre masas que puede ocasionar la formación de defectos

Las inspecciones periódicas de las muestras colocadas en el horno pueden revelar la presencia de defectos, como grietas o pandeos que en general pueden ser corregidos mediante el cambio de las condiciones de secado. Las grietas superficiales pueden ser cerradas mediante el incremento de la humedad dentro de horno (a 85%-90%) junto con un incremento de la temperatura (de 5° - 10°). Los pandeos son más difíciles, y a veces imposible, de solucionar mediante el método anterior y cuando lo son se precisa de cambios de temperatura y humedad considerablemente más drásticos. Otros problemas como ser la aparición de hongos o el ataque de insectos también son solucionados mediante incrementos de temperatura.

El contenido de humedad final de la madera depende del uso que se le vaya a dar. Si se la va a almacenar para su posterior uso, el contenido de humedad debe rondar el 20%, para uso estructural debe ser cercano al 12%, si se utilizará en interiores (como muebles) deberá ser del orden de 6%, etc. Otro factor a tener en cuenta para elegir el valor final de humedad que se quiere alcanzar es el costo, mientras más bajo sea este contenido más costoso será el procedimiento de secado.

Otros métodos de secado

Existen también otros métodos para el secado de la madera menos convencionales. Uno de ellos es el secado solar, que es una variante del secado al aire libre en el cual se diferencian los invernaderos y los acumuladores solares. Estos últimos utilizan la energía del sol para calentar agua y convertirla en vapor para ser transportada al interior de los hornos.

Otro tipo de secado es en el cual el vapor que se inserta en el horno se recicla. Esto se realiza mediante la no remoción de mismo hacia la atmósfera, sino que se utiliza el calor residual que este posee para aumentar la temperatura del horno sin aumentar la humedad del mismo

Entre otros tipos de secado se encuentran aquellos que se realizan a mayores temperaturas que las comunes (alrededor de los 100°) o aquello con continuos incrementos de temperatura. También existen algunos menos convencionales como el de utilización de sustancias químicas (con sales, por ejemplo), secado por inmersión en aceites hirviendo, por mecanismos eléctricos de alta frecuencia, etc.

III.2 – *Preservación de la madera*

La protección de la madera se logra generalmente con preservadores, que son sustancias químicas que aplicadas convenientemente a la madera la hacen resistente a los ataques de los hongos, insectos y perforadores marinos. El efecto protector se consigue haciendo la madera venenosa o repelente a los elementos biológicos que la atacarían si ella no estuviera tratada.

Un buen preservador debe ser: a) Tóxico para los destructores de la madera.

b) Permanentes.

c) Seguros de manejar y de usar.

d) No ser corrosivos para la madera y el metal.

e) Abundantes y económicos.

Si la madera es usada en la construcción de artículos manufacturados ejemplo puerta, ventana, etc., el preservador debe ser además: Limpio, incoloro e inodoro e hidrófugo.

Tipos de Preservadores

Preservadores Solubles en Líquidos Orgánicos: Consisten en soluciones de un preservador en un solvente volátil tal como parafina o turpentina mineral, cuyas características son las siguientes:

a) Son resistentes a la lixiviación con agua y apropiados para la mayoría de los trabajos, tanto en interiores como en exteriores.

b) Generalmente no son posibles de impregnar con colorantes y no son corrosivos.

c) Es posible pintar la madera tratada con este tipo de preservador, después de un cierto período.

d) No producen cambios en las dimensiones y formas de la madera.

e) Algunos son inodoros, pero no deben usarse en madera que esté en contacto con ropas o alimentos, pues son venenosos.

f) Los solventes son inflamables y por lo tanto, deben guardarse las debidas medidas de seguridad en el manejo y aplicación.

Algunos preservadores solubles en líquido orgánicos son a base de clorofenoles, tal como el Pentaclorofenol. Otros son a base de Naftenatos, como el Naftenato de Cobre.

Preservadores Hidrosolubles

Consisten en soluciones de sales simples o mezclas de ella, cuyas características son las siguientes: a) Son de carácter permanente.

b) No son inflamables, pero algunos corroen los metales.

c) Aunque algunos preservadores de este tipo colorean la madera, no impiden pintarlas o teñirlas después del proceso de protección.

d) La mayoría son inodoros, pero se debe tener la precaución, con algunos de ellos, cuando la madera va a ser usada en contacto con alimentos, porque pueden ser venenosos.

e) La madera impregnada con este tipo de preservador debe apilarse después del tratamiento, para permitir que se seque nuevamente.

f) Es posible que se produzcan variaciones de forma y dimensiones.

Un tipo de preservador hidrosoluble es el Sulfato de Cobre, que aún se usa en agricultura para postes, estacas, etc. Los preservadores más usados son: Cobre - Cromo-Arsénico: CCA (El más usado en Uruguay), Cobre-Cromo-Boro: CCB (Se usa en zonas desérticas, por su tendencia a la lixiviación).

Métodos de Preservación

a) Métodos sin presión: Estos métodos no proporcionan una buena penetración pero son aconsejables para ciertos usos.

1. Brocha o Esparcidor: Es el método más fácil, pero el menos efectivo. Se recomienda para preservar madera "in situ". Se debe usar sólo madera seca. La mejor penetración que se puede lograr es 2 mm de profundidad.

2. Inmersión: Consiste en sumergir la madera en un baño de preservadores durante un corto periodo. Tiempo de Inmersión: 10 segundos a

3 minutos. La penetración lograda es ligeramente superior al método de la brocha o esparcidor. Todos los preservadores pueden usarse con este método.

3. Inmersión Prolongada: La madera se sumerge en preservadores en frío. Tiempo de inmersión: desde horas hasta días o semanas. Una buena impregnación depende del tipo y calidad de la madera y el tiempo de inmersión.

4. Tratamientos Baño Caliente – Frío: Tiempo total del tratamiento: 24 Horas. Es aplicable para madera permeable. No se recomienda para maderas refractarias. Toda la absorción ocurre durante el periodo de enfriamiento. La absorción depende de: la temperatura máxima de calentamiento, de la temperatura mínima de enfriamiento y de la especie maderera. Para madera seca se necesita: Período de calentamiento 2 a 3 horas y 4 a 5 horas de enfriamiento. Es esencial que la madera se mantenga sumergida completamente, ya sea con pesos o apoyos apropiados.

Método Baño Caliente – Frío: El método consiste en introducir un líquido caliente que eleve la temperatura de la madera, causando la expulsión de parte del aire contenido en el interior de las células, por expansión. Esto se manifiesta en la superficie del líquido por la presencia de burbujas, que aparecen en ella, durante el período de calentamiento. Con el enfriamiento el aire contenido en las células se contrae, creando un vacío parcial en la madera, con lo cual el preservador es forzado a penetrar en ella, impulsado por la presión atmosférica que existe en el líquido.

5. Otros Tratamientos: Tratamiento de Base. Tratamiento de Difusión. Tratamiento por Doble Difusión. Tratamiento de Vapor y Enfriamiento. Tratamiento de Pulverización.

b) Métodos con Presión: La impregnación con presión es el método más efectivo para preservar madera que será usada en lugares con peligro de pudrición y ataque persistente de insectos xilófagos. Si bien son métodos más costosos, por las instalaciones que se requieren, con ellos se logran penetraciones profundas y uniformes del preservador, proporcionando una protección más efectiva.

Los diversos métodos a presión difieren en algunos detalles, pero en general utilizan el mismo procedimiento en todos los casos. El proceso consiste en introducir la madera a impregnar en cilindros o autoclaves, abiertos en uno o ambos extremos, los que se cierran herméticamente y allí se somete la madera a la acción de la sustancia preservadora, en ciclos alternados de vacío y presión, en diversas modalidades que dan origen a los diversos procesos.

Los diversos métodos a presión usados para inyectar preservadores en la madera en cilindros cerrados pueden dividirse en dos grupos principales, llamados: procedimiento de célula llena y célula vacía.



Figura 21 - Planta de Impregnación (C.C.A)

a) Proceso de Célula Llena: Con este proceso se trata de retener en la madera la mayor cantidad posible del preservador que se ha introducido en el período de presión, dejando así la máxima concentración de preservador en la zona tratada. Este proceso se utiliza con preservadores del tipo hidrosoluble y retardador del fuego. Consta de las siguientes etapas:

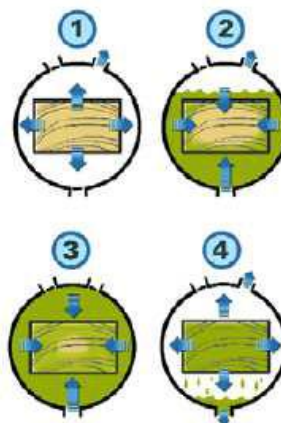


Figura 22 – Impregnación de la madera

1. Introducción de la madera en el cilindro y cierre hermético de éste.

2. Vacío Inicial (71 cm de Hg) por un tiempo determinado según sea la permeabilidad y espesor de la madera. Con él se saca el aire de las células de la madera, disminuyendo así la resistencia a la penetración del preservador.

3. Sin romper el vacío inicial, se introduce el preservador hasta llenar el cilindro.

4. Aplicación de una presión hidráulica hasta lograr una retención y penetración deseada. Este período puede durar entre 1 a 5 horas dependiendo de la permeabilidad de la especie a impregnar.

5. Extracción con bombas del preservador que sobra.

6. Aplicación de un vacío final para extraer el excedente del preservador de la superficie de la madera. Esto evita posteriores exudaciones y deja la madera más limpia para su manipulación, contribuyendo además a la economía del proceso.

Uso de madera preservada

La madera tratada con preservadores debe ser usada donde sea que pueda existir peligro de ataque de los agentes destructores. Esto significa que debe usarse en piezas de madera que estén:

- a) En contacto con el suelo.
- b) En o bajo terreno saturado.
- c) Totalmente rodeada de hormigón o albañilería.
- d) En lugares mal ventilados.
- e) En zonas o lugares en los cuales la humedad de equilibrio exceda de 20%.
- f) Sometida a la acción de aguas marinas donde puedan existir perforadores marinos.

Algunos usos de madera preservada son en: Durmientes; postes de cercos y rodrigones para viñas; postes de transmisión eléctrica o telefónica; torres de enfriamientos; pilotes; puentes; madera para construcción; madera contrachapada; madera para minas; y maderas para muelles o puentes.

Tipo de preservador	Descripción
CCA	Óxidos de Cobre, Cromo y Arsénico
Boro	Boro expresado como Oxido de Boro
CPF	Clorpirifos
CCB	Cobre – Cromo - Boro

Tabla ... Descripción de los preservadores

Preservador	Sistema de aplicación
CCA	vacio – presión
BORO – Protección Termitas	vacio – presión
BORO – Protección otros insectos	difusión
CLORPIRIFOS	- inmersión prolongada - vacio – presión - vacio – vacio

Tabla ... Sistema de Aplicación de los Preservadores Especificados

III.3 – Adhesión y adhesivos

El uso de productos naturales para elaborar pegamentos se remonta a tiempos antiguos. Los romanos, por ejemplo, usaban brea obtenida de la madera de pinos y cera de abejas como un adhesivo a prueba de agua para construir barcos. La cera de abejas sigue usándose hoy en día como un adhesivo confiable.

Los aztecas usaban sangre de animales combinada con barro como mezcla en la construcción de sus edificios, muchos de los cuales permanecen de pie en la actualidad.

En el siglo XVII fue expedida la primer patente para un en Gran Bretaña. Se trataba de un pegamento hecho a partir de pescado. Rápidamente se patentaron otros adhesivos que usaban caucho natural, huesos de animales, pescado, almidón y proteínas de la leche o caseína. La primera fábrica de pegamento fue inaugurada en Holanda por el 1960; luego fábricas similares fueron construidas en el Reino Unido (más precisamente en Inglaterra) en el 1700 y más tarde en los Estados Unidos en el 1808.

Adhesión de la madera

El encolado es una fase esencial de la fabricación y del desarrollo de nuevos productos derivados de la madera y de las estructuras de madera. Algunos ejemplos actuales de estos productos son la unión dentada de madera aserrada, los tableros laminados, las estructuras de madera laminada, el LVL (madera laminada en chapas o madera microlaminada), los tableros OSB, los tableros de partículas y de fibras, etc. El encolado nos permite obtener elementos de mayores dimensiones y utilizar tanto la madera de pequeñas dimensiones como los residuos/desperdicios obtenidos durante la mecanización de la madera. Las propiedades de los productos encolados se pueden controlar o predecir mediante una correcta selección o elección de la materia prima (tableros, láminas de madera, chapas, partículas o fibras), de los adhesivos y del producto estructural.



Figura 23 – Pegado de madera

Las propiedades de los productos pueden definirse y mantenerse con intervalos de variación (niveles de confianza) inferiores a los de la madera maciza. En las estructuras encoladas puede optimizarse la utilización de la madera como materia prima, por ejemplo empleando láminas de inferior calidad en el interior de la estructura y láminas de mayor calidad visual en las partes exteriores o vistas.

Los adhesivos y la tecnología de encolado Los adhesivos y la tecnología de encolado que se utilizan están muy influenciados por sus propiedades técnicas y medioambientales, por su comportamiento y por el coste de los productos encolados. Los adhesivos que más se emplean actualmente son los sintéticos o los basados en compuestos orgánicos y normalmente están formados por dos componentes. Por razones medioambientales los laboratorios están estudiando en profundidad los adhesivos procedentes de materias primas renovables (taninos, ligninas, carbohidratos y proteínas), pero casi no se utilizan en la práctica.

La unión entre la madera y el adhesivo se realiza principalmente a través de enlaces secundarios del hidrógeno y por el anclaje mecánico del adhesivo en el tejido poroso de la madera. Las características de la superficie de la madera son muy importantes para la formación de la unión encolada. La correcta distribución del adhesivo sobre la superficie es esencial o primordial para poder unir las dos superficies y para conseguir que el adhesivo se endurezca o fragüe adecuadamente. Los adhesivos se clasifican de acuerdo con su base química o su uso final (por ejemplo se puede hablar de adhesivos resistentes al exterior o resistentes al agua, adhesivos para estructuras, etc.). El conocimiento actual de la tecnología del encolado de la madera es deficiente. Apenas existen investigaciones sobre los mecanismos de la adhesión, sobre los factores que afectan a la adhesión entre los adhesivos o colas y los productos derivados de la madera, sobre su comportamiento a largo plazo y sobre las propiedades de las uniones encoladas en la madera. En el mercado se han introducido nuevos tipos de adhesivos o colas, pero la industria de productos forestales suele carecer de conocimientos o información a la hora de elegir el adhesivo adecuado. Los costes son bastante altos y el proceso de encolado puede ser un cuello de botella que frene la velocidad y la capacidad de producción.

Los fallos de encolado causan pérdidas desde el punto de vista productivo y a la vez debilitan la confianza en los productos de madera. La utilización de colas basadas en compuestos orgánicos para fabricar elementos encolados tiene peores efectos sobre el medioambiente si se los compara con los productos de madera sólida, ya que incrementan el consumo de materias primas no renovables y el uso de energía. Además algunas colas

pueden estar asociadas a riesgos de la salud, emisiones críticas o problemas en el tratamiento de los desperdicios y productos de demolición.

La optimización del encolado de la madera requiere la integración del conocimiento básico del adhesivo químico y de la madera como materia prima. La investigación sobre los adhesivos y el encolado de la madera se desarrolla tanto por los fabricantes de adhesivos y de equipos de encolado como por las unidades de tecnología y química de la madera de los centros de investigación y las universidades. Los fabricantes de adhesivos tienen un gran conocimiento de la química del adhesivo pero carecen del conocimiento del material madera. Los investigadores de los laboratorios de tecnología de la madera que trabajan en estos temas suelen ser pequeños y orientados hacia la aplicación y además carecen de una infraestructura dentro de la cual puedan intercambiar experiencias.

Factores de adhesión

Las propiedades de la madera que afectan la adhesión son varias y relativas a cada especie, siendo la de mayor influencia la densidad. Sin embargo, cuando se requieren uniones de larga vida útil es importante considerar otros factores, como hinchamiento y contracción, pH, presencia de sustancias oleosas que dificulten la penetración del adhesivo u otro tipo de exudantes que dificulten la unión.

a) *Densidad de la madera:* Entre otras razones que hacen ver la importancia que tiene la densidad de la madera en el pegado, se puede indicar el hecho de que en las especies menos densas existe un mayor volumen de espacio libre que permite la entrada del adhesivo facilitando una buena adhesión mecánica.

Se puede comprobar también que a mayor densidad encontramos mayores variaciones volumétricas al cambiar el contenido de humedad, lo que produce tensiones que en el caso de elementos adheridos deben ser soportadas por las uniones. Este efecto sumando a la relación existente entre densidad y volumen de espacio libre se traduce en que para especies de mayor densidad, las condiciones y factores que influyen en la formación de la junta deberán ser tratados de manera que permitan la obtención de una unión de mayor resistencia que la necesaria en una especie de densidad más baja. Respecto a la influencia de la densidad y como conclusión, se puede señalar que al utilizar especies de alta densidad se deben realizar uniones de mayor resistencia que eviten el despegado, para prevenirlo se debe lograr una buena preparación de la madera o introducir cambios en el adhesivo ya sea en el tipo o su concentración.

b) *Humedad:* La sensibilidad de cada tipo de adhesivo respecto a la humedad de la madera es diferente, pudiendo señalarse como norma el hecho de que la madera debe poseer contenidos de humedad que estén bajo el punto

de saturación de las fibras para obtener buenas uniones. La explicación de este requisito se basa en que uniones de mejores características se logran, en parte gracias a la absorción de adhesivo por la madera. Es así que con contenidos de humedad sobre el punto de saturación de las fibras, una gran parte de la solución de adhesivo permanecerá en la línea de unión, produciéndose juntas de poca resistencia. Bajo estas condiciones, muchos adhesivos en el proceso de endurecimiento no formarán una película homogénea y continua, sino que endurecen formando una masa que se desintegra fácilmente y sin buenas propiedades adhesivas. Cabe agregar que la madera, con humedad sobre el punto de saturación de las fibras, al ser puesta en servicio encontrará su humedad de equilibrio contrayéndose, provocando tensiones que pueden hacer fallar la unión.

Por el contrario, al encolar madera con contenidos de humedad demasiado bajos para los requisitos del adhesivo, o bien al pegar madera anhidra también se genera una unión defectuosa causada por uno o la combinación de los fenómenos siguientes: 1- Absorción exagerada del adhesivo produciéndose un fraguado anticipado de éste. A veces este efecto se ve acompañado por una desaparición de la línea de unión, no constituyéndose la junta o bien formándose una unión muy débil.

2- Fallas de la adhesión cuando la madera puesta en servicio alcanza su humedad de equilibrio hinchándose.

3- Al absorber la madera humedad del ambiente, el adhesivo también puede absorber parte de esta humedad cambiando las propiedades que tenía cuando estaba endurecido.

Como norma general, es necesario mencionar que cuando más delgada sea la madera que se pega, más preciso deberá ser el control de la humedad de está.

pH

El pH es un parámetro que nos indica la concentración de iones de hidrógeno en una solución. Sin embargo, la cantidad de iones H^+ que se encuentre está directamente relacionada con la concentración de iones OH^- , de esta manera al medir pH se determina si una solución es ácida o básica. Si consideramos que la velocidad del cambio de viscosidad del adhesivo, o su paso al estado sólido, depende de la cantidad de iones hidrógenos disponibles, podemos observar que el pH de la madera tiene una gran importancia en la adhesión. De esta forma tendremos que especies con pH ácido aceleran el proceso de fraguado del adhesivo, mientras que especies con pH básico lo retardarán. Dependiendo de las características técnicas del tipo de adhesivo utilizado, este efecto podrá ser negativo o positivo. Es necesario mencionar que al realizar el pegado en condiciones extremas de pH se producen uniones débiles.

Factores de adhesión del pegamento

El endurecido del adhesivo debe ser observado como un proceso de conservación desde el estado de sólido al estado viscoso. En él es fundamental la pérdida del medio portador. Tienen importancia sobre el endurecido del adhesivo una serie de factores, de ellos analizaremos algunos.

a) Tiempo de reunión: Una vez esparcido el adhesivo sobre la madera, inevitablemente transcurre un período de tiempo hasta la aplicación de las condiciones para el fraguado. Este período llamado tiempo de reunión se compone de dos partes; tiempo de reunión abierto, entre el esparcido y la unión de la madera, y tiempo de reunión cerrado, entre la unión de la madera y la aplicación de las condiciones de fraguado. Durante este periodo, el adhesivo comienza a endurecer y de acuerdo a las características técnicas de éste el tiempo de reunión debe ser regulado. Este control debe considerar que si el tiempo de reunión excede los límites máximos y mínimos permitidos por el adhesivo, éste no será capaz de formar una buena unión. Es necesario indicar que no es posible mejorar la calidad de una unión producida con tiempos de reunión no adecuados aunque las condiciones finales de fraguado (presión y temperatura) sean variadas.

b) Presión: La aplicación de presión es en ciertos casos la única condición ajena al adhesivo y a la madera que se utiliza para lograr la unión. Sin embargo, se debe tener presente que con algunos tipos de adhesivos no se requiere de presión. La producción de una buena unión, se puede determinar al observar que por medio de la presión se ha conseguido:

1. Un completo contacto entre las superficies de la madera.
2. El aire y parte del adhesivo que quedaba en la zona a juntar aflora en los bordes de la línea de unión.
3. Se produce una línea de unión fina, de igual espesor en toda la superficie a unir.
4. Se observa dedos de cola en las células de la madera.

La presión aplicada a los elementos que se desean unir debe permanecer durante gran parte del endurecido. En algunos casos el fraguado continúa aún después de prensado. Además, existe la posibilidad de efectuar el prensado en presencia de temperaturas adecuadas para mejorar el proceso.

c) Temperatura: Una parte de los adhesivos requiere de temperaturas superiores a las del medio ambiente para lograr una unión de óptimas características. El efecto de aplicar temperaturas se traduce en la disminución de la tensión superficial, lo cual facilita la penetración del adhesivo en la madera. Además, produce una evaporación y acelera las reacciones físico-químicas

que conducen al fraguado del adhesivo. El utilizar como factores de fraguado la temperatura conjuntamente con presión tiene una serie de ventajas sobre el utilizar solo presión. Entre ellas se pueden señalar como las más importantes; la reducción del tiempo de prensado y la posibilidad de aplicar una menor cantidad de adhesivo. Sin embargo, la instalación de estos sistemas requiere de altos costos de inversión, controles muy precisos de la humedad de la madera y una preparación extremadamente cuidadosa de la madera.

Clasificación de adhesivos

La clasificación de los diferentes tipos de adhesivos podría llevarse a cabo de acuerdo a un gran número de parámetros como ser: composición química de los constituyentes principales, durabilidad, resistencia, uso, características técnicas y otros. Sin embargo, se hace difícil el ordenarlos ya que la mayoría de estos conceptos están a su vez influenciados por otro tipo de factores tales como humedad de la madera, temperatura, formulaciones del adhesivo y otros.

a) Según composición química: De todos los tipos de clasificaciones que pretenden ordenar los diferentes adhesivos existentes, la más aceptada es aquella que hace discriminación en base a la composición química de sus ingredientes principales.

De acuerdo a esto se pueden clasificar en adhesivos: 1. *A base de materiales naturales*: I) Resinas vegetales, dextrinas y almidones.

II) Proteínas vegetales a base de soja, maní y otros.

III) Colas derivadas de proteínas animales.

IV) Lacas.

V) Gomas.

VI) Asfalto.

VII) Silicatos de sodio, oxiclورو de magnesio y otros minerales.

2. Adhesivos a base de resinas sintéticas: I) Resinas termoendurecibles, llamadas así ya que se estabilizan, pasando de estado de sólido a viscoso, en presencia de temperatura. Sus componentes químicos característicos son: urea, melamina, resorcina, fenoles, furfurano y poliésteres no saturados.

II) Resinas termoplásticas, que son aquellas que presentan como características el ser reversibles ante la presencia de temperatura. Es decir, a temperaturas bajas se presentan en estado sólido y para pegar la madera se debe

subir la temperatura hasta que la resina se licúe. Una vez pegados y unidos los cuerpos a adherir, se baja la temperatura hasta que la resina recupere el estado sólido. Sus componentes principales son: esteres, éter de celulosa, esteres de acrílico, poliamida, poliestireno, polivinil acetato, alcoholes de polivinilo y otros derivados.

b) Según durabilidad: De acuerdo a las normas British Standard Specifications los adhesivos se pueden clasificar según su durabilidad. Esta resistencia se puede determinar luego de exposiciones naturales durante algunos años, o bien mediante ensayos de probetas estandarizadas, con inmersiones en agua fría, caliente, hirviendo o en vapor, ordenándolas de acuerdo a su mayor o menor resistencia a estas condiciones. Se han determinado cuatro clases las cuales se describen a continuación: 1) Resistentes a la intemperie, microorganismos, agua fría y caliente, vapor y calor seco. En este grupo se encuentran los adhesivos fenólicos y de resorcina.

2) Buena resistencia a la intemperie y al agua caliente. Falla ante exposiciones a la intemperie muy prolongada buena resistencia al test de agua fría y resistencia al ataque de micro organismos. A esta clase se pueden incluir adhesivos de melamina y urea fortificada.

3) Resistencia a la intemperie solo por algunos años. Resisten al agua fría, pero en agua caliente la durabilidad es limitada. Sin resistencia en agua hirviendo. Estas características corresponden a las de ureaformaldehído pura o con menos de 25% de carga.

4) Resistentes al agua fría pero fallan a la intemperie, agua hirviendo y microorganismos. Se recomiendan solo para interiores. En este grupo encontramos adhesivos de: ureaformaldehído cuando tiene más de un 25% de carga, albumina de sangre caseína, acetato de polivinilo, adhesivos de contacto.



Figura 24 – Diferentes tipos de adhesivos

IV – MADERA LAMINADA

IV.1 – Características

Definición y Tipos de Laminados

Madera laminada es la unión de tablas a través de sus cantos, caras y extremos, con su fibra en la misma dirección, conformando un elemento no limitado en ancho ni en largo y que funciona como una sola unidad estructural. Dependiendo del elemento de unión, se tendrá diferentes tipos de madera laminada. Si el elemento de unión es clavo, será madera laminada clavada; si es perno, será madera laminada apernada y si es por medio de cola adhesivo, ésta se denominará madera laminada encolada, la cual es más conocida sólo como “madera laminada” y es a la que se hará referencia en lo que sigue.

Los elementos de madera laminada están formados por un determinado número de láminas, ubicadas paralelamente al eje del elemento. A su vez, las láminas están compuestas por una o más tablas de maderas unidas por su canto, cuya fibra es paralela al largo de la pieza. Por razones de secado y economía fundamentalmente, se ha llegado a la conclusión que el espesor de las láminas no debe ser inferior a 19 mm, ni sobrepasar los 50 mm.

Si las láminas son paralelas al plano neutro de flexión del elemento, se dice que la laminación es “horizontal” y, cuando éstas son normales al plano neutro de flexión, se dice que la laminación es “vertical”. De esta forma, se distinguen dos tipos de laminación: laminación horizontal y laminación vertical.

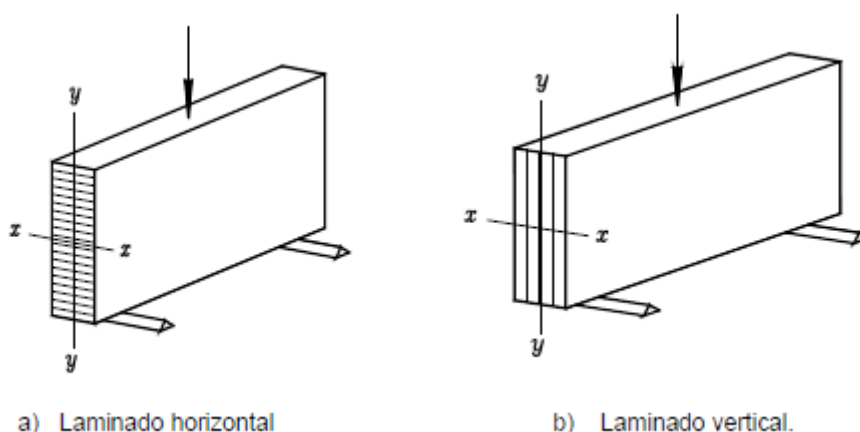


Figura 25 – Dirección de laminado

Reseña Histórica

En el mundo, la técnica de laminar ha sido utilizada durante muchos años en la fabricación de muebles, artículos deportivos y otros productos. Sin embargo, su aplicación en estructuras data de 1909, año en que fue erigida la primera, por Hetzer en Suiza. Actualmente, las estructuras de madera laminada constituyen un importante elemento de construcción, especialmente para edificios, apto para una extensa gama de aplicaciones, ya que permite la creación de estructuras estéticamente agradables y de grandes posibilidades de diseño arquitectónico y buena construcción.

La historia de la madera laminada está íntimamente ligada con el avance de la técnica, en lo que adhesivos se refiere. La caseína, en su forma actual, fue introducida alrededor del año 1900, aportando muy poco para esta nueva industria. Posteriormente, en 1912, fue introducido el fenol – formaldehído, produciéndose un gran auge en este tipo de estructuras usadas en forma intensiva hasta la II Guerra Mundial, época en que apareció el resorcinol –formaldehído (1943).

Ventajas de la Madera Laminada

El adhesivo permite el uso de tablas cortas y angostas que, unidas eficientemente, pueden conformar piezas estructurales de cualquier espesor, largo, ancho y de forma no restringidas. El espesor de las tablas, menor que 50 mm, permite secarlas fácilmente, al contenido de humedad deseado, antes de usarlas, con menos defectos de secado y, por lo tanto de la estructura misma. El método de fabricación permite el uso de láminas de menor calidad en las zonas de baja resistencia con la consiguiente economía, y utilizar madera de mejor calidad sólo en las zonas de mayor sollicitación (mayor esfuerzo unitario). Además, es posible usar combinaciones de distintas especies.

La madera laminada permite diseñar elementos que son prácticos y artísticos, en los cuales la sección transversal puede variar con los esfuerzos a que queda sometido el elemento. El elemento terminado no necesita estar oculto o tener una caja de ubicación, como es el caso de otras construcciones debido a que es estéticamente agradable.

Sus grandes dimensiones en la sección transversal, la hacen más resistentes al fuego. Estas se queman más lentamente y resisten la penetración de calor. Esto no significa que la madera laminada no sea combustible, el avance de la carbonización es muy lento (0,8 mm/min.).

Los elementos laminados tienen una baja relación peso/resistencia, por lo cual pueden ser levantados y puestos en servicio con un bajo costo, además de necesitar muy poco de la sección transversal para autoportarse.

Desventajas de la Madera Laminada

Muy a menudo son muy pesadas respecto al uso que se les da. Comparadas con la madera sin laminar, son más costosas, especialmente en vigas rectas; en vigas curvas no hay comparación.

El factor económico comprende tres rubros: Adhesivo, Mano de Obra y Madera. Lo más caro suele ser la madera, luego está la mano de obra y, por último el adhesivo.

El factor pérdida durante su fabricación es bastante elevado, alrededor de 50%, tanto en madera como en adhesivo, debido a las uniones de extremos, terminaciones y consideraciones de diseño.

El adhesivo debe estar condicionado al uso que se le va a dar al elemento. Así, los adhesivos que se requieren para estructuras que van al exterior son de elevado costo. En Uruguay hay que importarlos.

Se necesita, para su fabricación, de equipos y técnicas especiales. Los equipos son caros y se debe conocer el proceso de fabricación además de contar con mano de obra especializada.

No siempre se pueden producir en obra, lo cual implica un costo adicional para transporte que, a veces, llega a ser elevado, especialmente cuando los elementos son grandes. Elementos de gran longitud y gran curvatura son difíciles de manipular, embarcar y transportar lo que incide en el costo final del elemento de madera.

Aplicaciones

Las principales aplicaciones son: vigas rectas, arcos y marcos, aptos para ser aplicados a escuelas, gimnasios, teatros, iglesias, galpones, etc.

1. Vigas Rectas: La viga recta de sección transversal uniforme de madera laminada es la más barata de producir, independiente de la forma de la sección transversal, sea esta rectangular, T, dobleT, cajón, etc., como asimismo los pilares laminados de sección constante. Con vigas rectas de sección constante es posible llegar hasta 30 metros. Las vigas de sección

transversal variable, son de aspecto agradable, desde el punto de vista arquitectónico y prácticas, desde el punto de vista estructural, ya que la sección transversal se puede hacer variar, de acuerdo a los esfuerzos a que estará sometida la viga.

2. Arcos: La gran ventaja que ofrece el encolado para este tipo de estructuras, es que hace posible la construcción de arcos muy eficientes, partiendo de láminas delgadas. Estas no tienen competencia en cuanto a esbeltez, belleza y luz. Resultan elementos esbeltos, ya que su forma asemeja mucho al diagrama de momentos flector. Tomando en cuenta la dificultad de transporte y la luz del arco, ellos se diseñan en una, dos, tres o más pares. De acuerdo a esto, los de una unidad se denominan bi –articulados; los de dos unidades, triarticulados; los de 3 ó 4 partes, reciben el nombre de arcos de 3 ó 4 secciones, respectivamente. Las uniones entre unidades se hacen por medio de planchas metálicas.

3. Marcos: Los más frecuentes son los marcos – tri – articulados, constituyendo una aplicación muy atractiva de la madera laminada, desde el punto de vista arquitectónico. Es, por supuesto, más caro que un arco, debido a que el marco rígido tiene que tomar mayores esfuerzos de flexión, esfuerzos que son comparativamente pequeños en los arcos. Debido a razones arquitectónicas, es muy probable que el marco tri –articulado mantenga siempre su popularidad. En este último, debe darse importancia al peligro de pandeo lateral cuando se diseñe la estructura.

IV. 2 - *Componentes de la Madera Laminada*

Madera

En general, cualquier especie maderera puede ser usada en madera laminada. Las características principales que se deben considerar son: Su resistencia, su apariencia estética, facilidad para secar, costo, disponibilidad, etc. La elección dependerá, finalmente, de las exigencias que se requerirán en servicio.

Las especies madereras más usadas en la fabricación de madera laminada, son las coníferas. Algunas latifoliadas se han empleado en madera laminada, seleccionadas por su valor estético, durabilidad o por su resistencia, sólo en grado limitado, por lo cual no es posible garantizar su adaptabilidad para propósitos estructurales, o sus características para ser encoladas. La razón del mayor uso de las coníferas es la abundancia de estas especies en casi todos los países del mundo.

Adhesivos

Aunque la reputación general de los adhesivos, como un agente de unión en la madera, es extremadamente satisfactoria, se han registrado diversos casos de fallas. Una parte de estos se pueden atribuir, a adhesivos defectuosos, a la baja calidad y a la dosificación incorrecta de las materias primas componentes, pero la mayor parte de ellos se deben indudablemente al uso de tipos inadecuados de adhesivos.

Una razón menos obvia de fallas de adhesivos, y que es a menudo difícil de ubicar, es la administración incorrecta del adhesivo por parte del consumidor; ya sea en las operaciones de mezclado, aplicado y prensado. La confección de una unión satisfactoria incluye factores tales como: La selección de un adhesivo adecuado al tipo de madera a unir, la elaboración de la madera y control de su contenido de humedad, la adquisición del equipo apropiado y el acondicionamiento de las uniones después del encolado.

Un buen encolado depende, tanto del adhesivo como de la técnica; y consumidor y fabricante deben colaborar a fin de obtener los mejores resultados.

Los adhesivos usados en madera laminada son: El resorcinol-formaldehído, fenol-formaldehído, melamina-formaldehído, urea-formaldehído y caseína.

Los adhesivos de resorcinol y de fenol-formaldehído son los más durables e indestructibles. Se recomiendan para estructuras que estarán al exterior o en ambientes de condiciones severas. Por lo general son de color oscuro. Los adhesivos de melamina y urea son de menor duración, siendo ésta un poco más alta en los de melamina.

Ambos se aplican adecuadamente para servicios de interior, en donde no están sometidos a exposiciones prolongadas de intemperie ni a condiciones de humedad. Se les conoce como del tipo de termofraguables, a pesar de que fraguan a la temperatura de ambiente, debido a que no se pueden “refundir” o ablandar con el color, una vez curados.

IV.3 - Fabricación

La producción de elementos de madera laminada requiere de una fábrica especialmente organizada para tal propósito. Su diseño y organización puede estar influenciado por el tipo de productos que se fabrica. Por ejemplo, la industria de construcción de barcos tiene un tipo de moldes que es diferente de aquel que usa la fábrica que confecciona elementos estructurales.

Con el objetivo de interiorizarse con este proceso, se visitó la fábrica MercoMadera ubicada en la ciudad de Pando, Canelones, Uruguay. Allí se tuvo la oportunidad de observar el proceso completo y tomar fotografías que son las que ilustrarán este capítulo.

Cuando se proyecta una fábrica de madera laminada, se deberá partir de una planificación completa, que permita, posteriormente, aumentar la superficie de trabajo con facilidad, de acuerdo a las necesidades que se presenten. Otro aspecto muy importante y que es necesario cuidar, es el costo del traslado dentro de la fábrica, motivo por el cual la ubicación de maquinaria en los lugares de trabajo, deberá ser utilizada de tal manera que

presente facilidades para el transporte interno y externo del elemento que se fabrica.

Es posible fabricar madera laminada en espacios reducidos, aunque tiene la desventaja de que los costos resultan elevados y, además se presentan limitaciones en la manufactura de ciertos tipos.

La mayoría de las fábricas se organizan en tres secciones de áreas. Las cuales son: Área de pre-encolado; área de encolado, prensado y fraguado y área de terminaciones.

Para cada una de las secciones mencionadas se necesita una superficie más o menos similar. Las dos últimas, deberán ser equipadas con grúas, destinadas a mover piezas pesadas de gran tamaño. Un requerimiento necesario en una fábrica de madera laminada bien organizada, es el control de la temperatura y humedad relativa ambiental, a fin de asegurar que la madera se mantenga, durante la fabricación, a un contenido de humedad adecuado. Una temperatura comprendida entre 16 a 20° C y una humedad relativa entre 55 y 65 %, aseguran que ello sea posible.

Es difícil fijar el exacto tamaño de una fábrica de laminados, pero, como guía razonable, se recomienda que el largo y el ancho de cada una de las tres secciones, no debe ser menor que la longitud del elemento más largo que se pretende fabricar.

Área de Pre – Encolado

1. Almacenamiento: El proceso de fabricación de la madera comienza con el almacenamiento de la madera seca. La fábrica puede contar con sus propios secadores, lo cual sin duda, es más conveniente, ya que se podrá secar la madera a la humedad óptima para cada elemento. En tal caso, el secado se agrega como una actividad más al proceso de fabricación. Lo ideal es que la madera a usar sea secada artificialmente, en la fábrica y sea almacenada de modo que no se produzca un cambio apreciable en su contenido de humedad.



Figura 26 – Almacenamiento en MercoMadera

2. Clasificación: La clasificación a realizar en la madera aserrada destinada a madera laminada, es una clasificación estructural (por resistencia) para laminados, incluyendo algunas veces otros defectos propios de la clasificación por aspectos. La clasificación debe hacerse de acuerdo a las normas o especificaciones que se han establecido con anticipación. Esta se podrá realizar en forma visual, o bien en forma mecánica.

3.



Figura 27 – Selección de madera

4. Determinación del Contenido de Humedad: El contenido de humedad óptimo es aquel que produce la unión encolada más resistente y que al ser incrementado por el agua del adhesivo, se acerque lo más posible al contenido de humedad de equilibrio que tendrá el elemento laminado, cuando esté en servicio. En todo caso, el contenido de humedad de la madera destinada a madera laminada no debe ser superior al 16% en el momento del encolado. Además, entre lamelas adyacentes no debe existir una diferencia de humedad superior a 3% y, entre la lamela más húmeda de una sección transversal y la más seca, tal diferencia no debe sobrepasar del valor 5%. Si las tablas con las cuales se construirán las lamelas tienen diferentes contenidos de humedad, debe procederse a la homogenización de ellas. De otra forma, se producirá un juego en la madera que redundaría en la delaminación de las líneas de encolado. El control del contenido de humedad se efectúa con un xilohigrómetro y se debe realizar a cada tabla.



Figura 28, determinación del contenido de humedad

5. Uniones de extremos: Estas uniones se realizan para lograr elementos cuya longitud sea superior al largo que es posible obtener en la madera comercial. Pueden ser de tope, biseladas y empalmes endentados (finger-joints y hooked scarf-joints). El tipo de unión más usado en madera laminada es la unión endentada (finger-joints), dada la calidad de la unión que se obtiene. Cualquiera sea el tipo de unión de extremos

que se confeccione, debe ser hecho con precisión, correctamente alineada y fraguada con eficiencia. Cuando se haga necesario obtener piezas de anchos mayores que los usuales, es decir, cuando el ancho de la madera comercial sea inferior al ancho de la estructura requerida, se deben realizar uniones de canto.

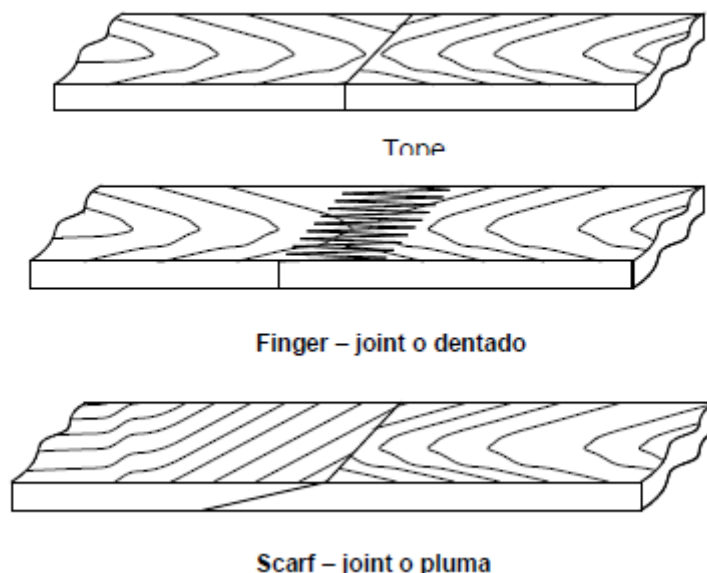


Figura 29

6. Elaboración de las lamelas: Una de las actividades de esta etapa es el establecimiento de un espesor constante de las lamelas. La madera que se usa para la fabricación de elementos laminados, generalmente se restringe a 50 mm de espesor. La razón de esta limitación es la dificultad y costo del secado de tablas más gruesas que 50 mm, a la humedad requerida para el laminado. Posteriormente, es necesario preparar las superficies de las lamelas para el encolado, para lo cual se requiere cepillarlas. Se ha demostrado que un buen cepillado, realizado 24 horas antes del encolado, produce líneas de encolado de buena calidad y resistencia.

7. Ensamble en seco: En general consiste en ubicar las lamelas como mejor cumplan con las especificaciones y exigencias que se le imponen al elemento que se pretende fabricar, colocándolas tal como van a quedar, pero sin adhesivo. El ensamble en seco se debe realizar de modo que la última lamela a colocar debe ser la primera que se pase por la encoladora. El realizar esta operación, hace que el encolado sea más rápido.

Area de encolado, prensado y fraguado

1. Preparación de moldes y prensas : El tipo de molde y prensas a usar debe ser tal, que el elemento laminado a fabricar resulte de la forma deseada. La forma y método de prensado depende del tipo de producción, del espacio útil disponible en la

fábrica del rendimiento o producción que se espera obtener. El sistema de molde y prensas está constituido, en su forma más simple, por un determinado número de escuadras que también se usan como prensas y están firmemente fijada al piso dando forma al elemento laminado. Las lamelas encoladas por su cara se colocan sobre ellas se prensan hasta que la línea de encolado haya fraguado. Los moldes y prensas pueden construirse tanto de acero como de madera. Ambos materiales resultan igualmente eficientes. En el proceso mismo de fabricación, se deben dejar los bloques, tensores, tuercas, golillas, etc, conveniente dispuestos, de tal forma que éstos sean puestos lo más rápidamente posible, una vez que se haya colocado la última lamela del elemento que se está fabricando. Los elementos de madera requieren reemplazos más frecuentes y debe cuidarse durante el proceso de prensado, que el adhesivo que escurre de las uniones no se adhiera a ellos. Los moldes de acero se construyen con perfiles C. Las prensas de madera consiste en bloques de madera dura, con orificios de 25 mm de diámetro, apernadas y convenientemente empotradas. El prensado se obtiene con tensores unidos a los bloques cuyo diámetro es, por lo general, 25 mm pudiendo ser menor, lo cual dependerá de las dimensiones del elemento a encolar.

2. Preparación del adhesivo: El adhesivo especificado debe mezclarse correctamente, siguiendo las instrucciones del fabricante. La mezcla del adhesivo debe hacerse con la suficiente anticipación, de modo que, al iniciar el proceso de laminación, el adhesivo ya esté apto para su uso. El realizar esta operación hace que el encolado sea más rápido.

3. Esparcido: Existen diferentes métodos para realizar el esparcido del adhesivo: brocha, rodillos manuales, pistola o esparcidores mecánicos. Se entiende por esparcido a la cantidad de adhesivo colocado en una unidad de superficie, expresándola en g/m². Generalmente varía entre 250 a 450 gr/m² Para cada tipo de adhesivo, existe un esparcido óptimo con el cual se obtiene el mayor rendimiento y resistencia. Existen dos tipos de esparcido: simple y doble. En el esparcido simple, se encola una cara de la unión y, en el esparcido doble, se encolan ambas caras. Para determinar la cantidad de adhesivo que aplica un esparcidor mecánico, se debe usar una Tabla de espesor igual de las lamelas a encolar. Se mide su área y se pesa antes de encolar. Después de aplicar el adhesivo en ambas caras, se vuelve a pesar, deduciendo de ambas pesadas la cantidad de adhesivo aplicado. Dividiendo este valor por el área se tendrá el esparcido doble. Esto se puede hacer repetidamente, hasta ajustar el esparcidor mecánico al valor requerido. Se debe tener particular cuidado al sacar las lamelas del esparcidor y colocarlas en los moldes, pues un trato descuidado puede romperlas, lo cual implica un retraso en el resto de la operación, pudiendo provocar a la vez, el fraguado del adhesivo esparcido.

4. Prensado: Una vez encoladas, las lamelas deben ser colocadas en las prensas. Al aplicar la presión, con pernos y tuercas, un operador debe fijar la tuerca móvil. Cuando la presión es aplicada con métodos neumáticos, sólo bastará fijar la presión en un manómetro que esté en buenas condiciones. La presión recomendable debe ser tal que provoque un escurrimiento parejo del adhesivo, a lo largo de toda la línea de encolado. Es recomendable, para las coníferas, una presión comprendida entre 5 y 7 kg/cm² y para las latifoliadas: entre 10 y 15 kg/cm².

5. Reapriete: Después de 10 a 15 minutos de haber aplicado la presión, es necesario comprobar que no ha existido una pérdida de la presión aplicada, la cual puede ser causada, entre otras razones, por el escurrimiento del adhesivo, debido a la presión aplicada. Si esto ha sucedido, se deberá proceder a un reapriete. Los tiempos entre reaprietes serán cada vez mayores y dependen de la calidad de los materiales que componen el elemento.

6. Tiempo de prensado: Es esencial que el elemento laminado ensamblado permanezca en los moldes, sometido a presión, bajo la temperatura ambiental y humedad relativa requerida, por un período de tiempo tal, que asegure una resistencia suficiente de la línea de encolado. Sólo una vez que exista la certeza de que esto haya ocurrido, se procederá desmoldar la pieza. El tiempo prensado dependerá de la temperatura de fraguado de las líneas de encolado, del tipo de adhesivo usado y del catalizador. Es común que el período de prensado sea aplicado durante la noche, a fin de aprovechar la jornada diaria. Los tiempos de prensado para los diferentes adhesivos son recomendados por los fabricantes. Aun cuando mucho adhesivos producen excelentes líneas de encolado cuando fraguan a temperaturas ambientales, el período de prensado puede ser ampliamente reducido si se aplica calor a las diferentes líneas de encolado. Para tal efecto la temperatura se debe controlar, con instrumental, a fin de impedir que la madera se seque, se contraiga y produzca una línea de encolado pobre.

7. Maduración: Una vez que el elemento se ha removido de la prensa, él debe quedar inmóvil por un período determinado, antes que se proceda a su procesamiento final. Este período se denomina "tiempo de maduración". La resistencia total no se logra durante el período de prensado. Durante él y hasta la extracción de las prensas, el adhesivo sólo ha fraguado pero, se necesita un período de tiempo para desarrollar totalmente la resistencia de la unión, por lo que es conveniente dejarlo un tiempo en reposo, a una temperatura adecuada. El tiempo de maduración dependerá del tipo de adhesivo, de la temperatura ambiental donde se ha almacenado el elemento y puede tener una duración comprendida entre una a dos semanas.

Area de Terminaciones

1. Elaboración: Consiste en un despunte, canteado, cepillado y pulido del elemento laminado cuando él tiene ya sus líneas de encolado fraguadas. Se procede a limpiar el adhesivo que ha escurrido a causa del prensado, se corta al largo requerido (despunte), se cepilla a las dimensiones especificadas, se efectúan las perforaciones para las uniones (cuando son ejecutadas en fábrica) y se pulen las superficies. Es posible efectuar el recorte y el cepillado del elemento con equipos portátiles. Estos emplean más tiempo y no realizan un trabajo tan seguro ni tan preciso, pero, a veces, es la única alternativa para proceder con la elaboración de elementos laminados de grandes dimensiones. Una combinación de ambos sistemas es ventajosa, pues con el equipo portátil se remueve el adhesivo que ha escurrido, antes de colocar el elemento en la cepilladora fija.

2. Dimensiones y tolerancias: Las dimensiones y forma de la madera laminada se deben acordar entre usuario y productor, antes del proceso de fabricación.

3. Clasificación: Esta operación consiste en una clasificación por aspecto del elemento laminado terminado. La clasificación por aspecto se circunscribe a las superficies o caras del elemento laminado e involucra las operaciones de elaboración que se realizan en ellas no así a los elementos propios de la laminación, pinturas, barnices u otros recubrimientos protectores

4. Arquitectónica: Cada elemento de esta clase debe presentar sus cuatro caras cepilladas y lijadas. Los huecos que aparecen en las caras deben ser rellenados. Los parches se fabrican con igual color, colocándose con sus fibras paralelas a las del elemento laminado. Las lamelas externas deben estar libres de nudos sueltos y de agujeros y ser elegidas con cuidado de modo que coincidan en color y dirección de la fibra en las uniones de extremos. Esta clase es recomendada para usos en los cuales el aspecto es de primera importancia. Los elementos arquitectónicos son aptos para pulirlos y barnizarlos.

5. Clasificación: Para uso comercial, cada elemento debe presentar sus caras cepilladas. Los daños y manchas en las superficies no necesitan ser mejorados. Las lamelas exteriores deben estar libres de nudos sueltos y de agujeros. Se recomienda esta clase de usos en los cuales el elemento queda a la vista, pero donde el aspecto no es importante. No se recomienda pulir o barnizar las superficies. Una terminación aceptable es con pintura, la que no debe ser aplicada antes que el elemento sea inspeccionado por calidad. Para uso industrial, el elemento de esta clase se usa tal como sale de prensa. Los daños y manchas en las caras no necesitan ser mejorados. Se recomienda esta clase en usos en los cuales el elemento queda oculto, o donde el aspecto no tiene importancia.

6. Protección y preservación: Los elementos laminados deben ser adecuadamente recubiertos con líquido a prueba de agua (pinturas y barnices), a fin de impedir que la humedad alcance las líneas de encolado de adhesivos para interiores. De esta forma se evita que la madera absorba agua. Esta protección debe hacerse cualquiera sea el adhesivo o especie maderera usada. Con el fin de darle mayor vida útil a la madera laminada, se deberá proteger, especialmente, contra la pudrición, ataques de microorganismos e insectos y contra la acción del fuego.

7. Inspección y ensayos: El control del proceso de fabricación de elementos laminados estructurales tienen como finalidad asegurar que ellos cumplan con los requerimientos de la norma. Los procedimientos de inspección y ensayos que se deben realizar, para lograr tal objetivo, son: Por parte del fabricante, control diario de la producción, las que se deben orientar hacia aquellas variables que pueden afectar la calidad del producto. Por parte de una Entidad de Certificación, será la encargada de emitir los certificados solicitados por usuarios o fabricantes de elementos laminados estructurales, de un determinado número de productos (lotes o partidas) de características previamente definidas.

IV.4 - Ensayo de viga en laboratorio.

Para realizar los ensayos se comenzó por adquirir la madera que iba a ser utilizada. Las maderas consideradas fueron: Eucaliptus y Álamo. El Eucaliptus observado fue descartado por su cantidad de imperfecciones (nudos y fendas principalmente) que afectarían una buena fabricación de vigas de madera laminada con el instrumental que se contaba. El Álamo, si bien es una madera blanda que no se utiliza para la fabricación de este producto, poseía pocas imperfecciones, se presentaba en dimensiones adecuadas y tenía un costo razonable por lo que se decidió utilizarse. Se calculó la cantidad necesaria de material para realizar 6 vigas de madera laminada de 1,20x0,25x0,06 metros y disponer de una porción de madera para utilizarse como referencia en la comparación de las vigas con la madera maciza. De este modo, se adquirieron tres tablones de Álamo de 2,40x0,25x0,06 metros.

Posterior a la madera se debió elegir el adhesivo a utilizar, optando por cola vinílica y un pegamento de secado rápido a base de difenil metileno dissociado. Si bien la cola no es utilizada en la confección de vigas de madera laminada, uno de los objetivos principales de los ensayos realizados fue comparar la eficiencia de los diferentes adhesivos.

Una vez elegidos los materiales, se procedió al cortado de los tablones para formar 48 piezas de madera de 1,20x0,047x0,02 metros que formarían las lamelas de las vigas y una pieza de madera maciza de 1,20x0,149x0,054 metros.



Figura 30 – Determinación de masa y la humedad de la madera

Una vez en el laboratorio, se realizó la primera clasificación de las lamelas mediante el método visual. Dado que para armar las seis vigas se precisaban 42 lamelas, se eligieron las 6 que tuvieran más defectos (nudos o fendas) y se descartaron.

A continuación, se midieron las masas de cada una de las lamelas y su respectivo contenido de humedad mediante un xilo-higroscopio. Dichos datos serán utilizados para los cálculos posteriores.

Posteriormente, se procedió a realizar el primer ensayo. Este fue el de determinación del módulo de elasticidad (MOE) mediante la medición de la vibración de las piezas de madera cuando son atravesadas por una onda sonora. Para esto se utilizó el software “FFtAnalyzer” el cual realiza las mediciones de vibración mediante un micrófono ordinario y este calcula la frecuencia de dicha onda. Para el correcto uso del software, se tomaron varias medidas de cada lamela de tal forma de evitar valores afectados por el ruido ambiente o por algún error no sistemático. Este software, también venía provisto de una hoja de cálculo mediante la cual, ingresando los datos de densidad (obtenidos mediante el cálculo con las dimensiones y la masa), devuelve el módulo de elasticidad de la pieza. Los datos obtenidos fueron los siguientes:



Figura 31 – Determinación del módulo de elasticidad (MOE)

	Frecuencia (Hz)	Humedad (%)	Masa (g)	Masa (kg)	Densidad (kg/m³)	Velocidad (m/s)	MOE (Gpa)
1	DESCARTADA						
2	2150	15,5	487,8	0,4878	442,02	5048,20	11,26
3	2213	14,6	518,7	0,5187	470,02	5196,12	12,69
4	1674	15,5	486,6	0,4866	440,94	3930,55	6,81
5	2133	14,9	497,5	0,4975	450,81	5008,28	11,31
6	2201	15,2	494,8	0,4948	448,37	5167,95	11,97
7	2178	16	495,9	0,4959	449,36	5113,94	11,75
8	1870	15,8	522,9	0,5229	473,83	4390,76	9,13
9	1794	16,6	487,9	0,4879	442,11	4212,31	7,84
10	2134	13,9	512,8	0,5128	464,68	5010,63	11,67
11	2156	15,8	490,4	0,4904	444,38	5062,29	11,39
12	2116	16,6	493,2	0,4932	446,92	4968,37	11,03
13	1685	15,8	486	0,486	440,39	3956,38	6,89
14	1919	17,3	527,3	0,5273	477,82	4505,81	9,70
15	DESCARTADA						
16	2109	13,6	506,9	0,5069	459,33	4951,93	11,26
17	1984	14,8	551,5	0,5515	499,75	4658,43	10,84
18	DESCARTADA						
19	1923	15,4	525,2	0,5252	475,91	4515,20	9,70
20	1689	17,7	538,3	0,5383	487,78	3965,77	7,67
21	DESCARTADA						
22	2147	15,7	507,4	0,5074	459,78	5041,16	11,68
23	2080	15,6	509,3	0,5093	461,51	4883,84	11,01
24	2141	15,7	496,1	0,4961	449,55	5027,07	11,36
25	2142	16,4	506,3	0,5063	458,79	5029,42	11,61
26	1945	16,3	485,5	0,4855	439,94	4566,86	9,18
27	2136	16,4	492,8	0,4928	446,55	5015,33	11,23
28	1721	16	500,3	0,5003	453,35	4040,91	7,40
29	1950	16,4	523	0,523	473,92	4578,60	9,94
30	1615	15,8	496,2	0,4962	449,64	3792,02	6,47
31	2028	16,1	516,3	0,5163	467,85	4761,74	10,61
32	DESCARTADA						
33	2170	13	500,6	0,5006	453,62	5095,16	11,78
34	2013	15,3	498,9	0,4989	452,08	4726,52	10,10
35	1640	16,1	487,9	0,4879	442,11	3850,72	6,56
36	2048	16,3	507,2	0,5072	459,60	4808,70	10,63
37	1669	15,9	505,8	0,5058	458,33	3918,81	7,04
38	2139	14,9	511,1	0,5111	463,14	5022,37	11,68
39	2140	15,8	527,2	0,5272	477,73	5024,72	12,06
40	3972	15,7	511,6	0,5116	463,59	9326,26	40,32
41	2182	16,8	542,2	0,5422	491,32	5123,34	12,90
42	1878	15,6	512,9	0,5129	464,77	4409,54	9,04
43	2041	15,4	485	0,485	439,49	4792,27	10,09
44	1882	15	495,4	0,4954	448,91	4418,94	8,77
45	1767	16,1	518,2	0,5182	469,57	4148,92	8,08
46	1902	15,7	515,8	0,5158	467,40	4465,90	9,32
47	DESCARTADA						
48	1963	14,3	532,3	0,5323	482,35	4609,12	10,25
Macizo	1850	15,2	3900	3,9	3534,02	4343,80	66,68

En esta tabla se pueden observar varios fenómenos:

1. Las frecuencias de vibración de las diferentes lamelas son considerablemente similares salvo en el caso de la lamela número 40 en la cual no se pudo determinar el motivo del valor particularmente elevado, por lo cual si bien se decidió conservarlo no fue tenido en cuenta como un valor representativo. Debido al valor patológico, la mediana se considera un mejor valor de la frecuencia de estas piezas de madera, teniendo un valor de 2034,5 Hz.

2. Los valores de humedad dieron aún más considerados los unos a los otros y sugieren una distribución aproximadamente normal con un promedio de 15,65 % y una desviación estándar del mismo de 0,9 %. Dicho contenido de humedad es el adecuado sugerido para la realización de vigas de madera laminada.

3. Dada la consistencia de los datos anteriores, junto con los de la masa y volumen; los valores de módulos de elasticidad también resultaron similares entre sí (de nuevo, con la salvedad de la número 40).

4. La pieza de madera maciza también siguió la tendencia de las anteriores salvo, claramente, por el módulo de elasticidad que dio un valor notoriamente superior. Este es esperable dada la mayor rigidez de la pieza debida a sus dimensiones

El procedimiento anterior se realizó para decidir cuales lamelas eran las más adecuadas para ir en el exterior de la viga y cuales en el interior. Se optó un criterio arbitrario para formar vigas de tal forma que la viga quede formada por cuatro de las mejores en su exterior, dos de calidad media en el interior y una de mala calidad en el medio. Utilizando este criterio se confeccionó la siguiente tabla:

Macizo		
Adhesivo	VIGA A	22-23-19-13-14-2-10
	VIGA B	41-16-26-20-46-11-17
	VIGA C	25-27-29-4-36-34-24
Cola	VIGA D	40-48-45-35-44-5-3
	VIGA E	31-12-8-30-42-6-19
	VIGA F	7-33-9-39-28-38-43

Una vez determinada la forma en que las vigas serían armadas, solamente restaba proceder a una fabricación. Para ello, dispusimos las lamelas como es explicitado en el capítulo anterior y procedimos a aplicar ambos adhesivos, primero el difenil-metilo y luego la cola. Una vez confeccionadas las seis vigas y dada la falta de prensa, se procedió a colocar sobre las mismas una considerable cantidad de probetas de hormigón pesando 356,7 kg en total

y ejerciendo una tensión de $0,1 \text{ kg/cm}^2$. Esta disposición permaneció así por aproximadamente 24 horas.



Figura 32 – Encolado y prensado de la madera

Ya elaboradas las seis vigas, se procedió finalmente a realizar el segundo y último ensayo, este fue un ensayo de flexión a los extremos con una luz de 1,10 metros. Se ensayó primero la pieza maciza, luego las vigas con adhesivo difenil-metilo y por último las vigas con cola vinílica. Se determinó la carga aplicada por la prensa y la deformación que iba sufriendo la pieza a medida que esta era aplicada. Los datos obtenidos se expresan en las siguientes tablas:

			Carga de rotura (Kg)		
Macizo			2250		
Adhesivo	VIGA A	22-23-19-13-14-2-10	585		
	VIGA B	41-16-26-20-46-11-17	700		
	VIGA C	25-27-29-4-36-34-24	850		
Cola	VIGA D	40-48-45-35-44-5-3	1380		
	VIGA E	31-12-8-30-42-6-19	1250		
	VIGA F	7-33-9-39-28-38-43	1350		
Macizo			VIGA A		
Carga (Kg)		Deformación (cm)	Carga (Kg)		Deformación (cm)
0	5,9	0	0	5,9	0
500	5,7	0,2	500	5,3	0,6
1000	5,4	0,5	570	3,5	2,4
1500	5,1	0,8	580	3	2,9
2000	4,6	1,3			

VIGA C			VIGA B		
Carga (Kg)		Deformación (cm)	Carga (Kg)		Deformación (cm)
0	6	0	0	6	0
200	5,8	0,2	250	5,6	0,4
400	5,7	0,3	500	5,3	0,7
600	5,5	0,5	700	3,6	2,4
800	5	1			

VIGA D			VIGA E		
Carga (Kg)		Deformación (cm)	Carga (Kg)		Deformación (cm)
0	6,2	0	0	6	0
200	6	0,2	200	5,8	0,2
400	5,9	0,3	400	5,6	0,4
600	5,7	0,5	600	5,5	0,5
800	5,5	0,7	800	5,2	0,8
1000	5,3	0,9	1000	4,9	1,1
1200	5	1,2	1200	4,6	1,4
1380	4,6	1,6			
VIGA F					
Carga (Kg)		Deformación (cm)			
0	6,2	0			
200	6	0,2			
400	5,9	0,3			
600	5,8	0,4			
800	5,6	0,6			
1000	5,4	0,8			
1200	5,2	1			

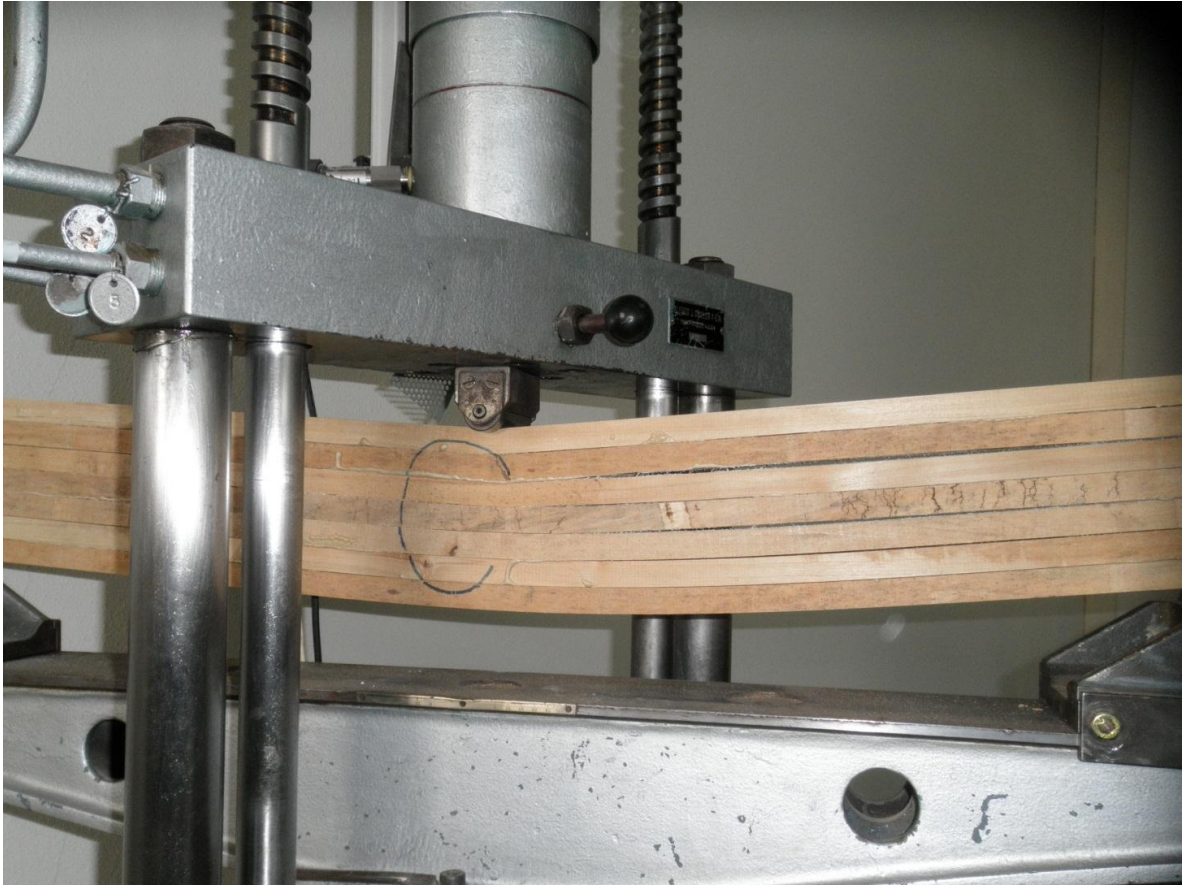


Figura 33 – Ensayo a flexión

Análisis de los datos

La viga de madera maciza fue la que tuvo un mayor valor de carga de rotura, seguida por las vigas laminadas confeccionadas con cola, y por último las laminadas con difenil-metilo. Pudimos observar que en las vigas laminadas en las que utilizamos difenil-metilo, la falla se dio debido al pegamento y no a la madera como era de esperarse ya que el álamo es de una dureza muy baja.

Como sabemos que el pegamento es de los mejores en el mercado, asumimos que el error no se da debido a los materiales, sino que, en este caso la equivocación está dada por el procedimiento. Más concretamente el problema se da al aplicar el adhesivo en una instancia muy previa a la de prensado. Esto da lugar al fraguado de mismo no permitiendo que este se adhiera adecuadamente en el momento del prensado.

Otro de los factores que influyó en el comportamiento atípico e inadecuado del adhesivo, fue que para un correcto desempeño de mismo, se debe aplicar en prensa una presión del orden de 10 kg/cm^2 , y al no contar con una prensa adecuada, las probetas de hormigón que actuaron en su lugar, ejercían sobre las vigas de madera laminada una presión 100 veces inferior ($0,097 \text{ kg/cm}^2$) a la recomendada.

Por estos factores concluimos que los resultados que obtuvimos, en el caso de las vigas con difenil-metilo, produjeron un resultado muy inferior al esperado, tanto así que fue menor inclusive que los resultados con cola vinílica (D1); siendo este último adhesivo de mucho menor calidad que el pegamento importado (D4).

En el caso de las vigas adheridas con cola vinílica, los resultados se pueden considerar representativos de este tipo de producto. Debido a esto y dados los valores obtenidos, es conveniente utilizar piezas de madera maciza en vez de vigas de madera laminada con cola vinílica.

Los resultados que fueron obtenidos para las vigas de madera laminada con adhesivo difenil-metilo se debieron a la inexperiencia de los operarios, por lo que no muestran el verdadero valor de la resistencia de la madera laminada, ni de su desempeño en el uso práctico.



Figura 34 – Rotura de madera maciza



Figura 35 – Rotura de madera laminada con adhesivo



Figura 36 – Rotura de madera laminada con cola

APÉNDICES

AP.1 – *Forestación en Uruguay*

Composición de los bosques en Uruguay

Según información de la Dirección General Forestal el sector forestal uruguayo cuenta con un área total de 1.721.658 ha, de las cuales 752.158 corresponden a bosques naturales y cerca de 1 millón de hectáreas a plantaciones predominando el género eucalipto, con 676.096 ha de eucalipto y 274.568 ha de pinos.

1. Bosques naturales

El bosque natural no presenta valor maderable, y la legislación vigente ha regulado su manejo, redundando en un incremento en el área total cubierta.

Existen más de 200 especies de varias familias, aunque la mayor parte tiene escaso valor comercial. Se destacan la *Sebastiania brasiliensis* (blanquillo) y *Scutia buxifolia* (coronilla) y *Prosopis* (algarrobo) como especies de cierto valor.

2. Plantaciones forestales

La economía forestal uruguaya se basa en plantaciones forestales; las mismas se han realizado en su gran mayoría al amparo de la Ley Forestal aprobada en el año 1987, que se implementó a partir de 1990. Parte de la concentración de plantaciones en zonas de suelos previamente determinados, y corresponde fundamentalmente a dos especies: *Eucalyptus* y *Pinus*.

Puede distinguirse una primera fase entre los años 1990 a 2001 que respondió a la captación de inversores, inserción de importantes empresas y régimen de beneficios fiscales y tributarios.

Entre el año 2002 y 2005 la tasa de plantaciones bajó, como consecuencia de la crisis económica y también de la incertidumbre acerca de la evolución de la industria, así como desaparición paulatina de los beneficios e incentivos tributarios y fiscales.

Durante este período se desarrollaron fusiones y ventas de activos, y el mapa forestal uruguayo cambió: los suelos de prioridad forestal sufrieron algunas modificaciones.

A partir de la instalación de la planta de celulosa de Botnia (hoy UPM), la ampliación de plantas industriales de maderas aserradas y contrachapadas, y el proyecto de fábrica de celulosa de Montes del Plata, se registra a partir del

año 2006 un importante incremento del área forestada y reforestada (no explicitada en el cuadro).

La especie dominante es el eucalipto, incluso cuando el objetivo es la transformación mecánica de maderas: se han desarrollado métodos de manejo forestal con rotaciones largas (20 años en eucaliptos y 25 en pinos) que finalizan con densidades de 200 a 250 árboles por hectáreas, con madera totalmente libre de nudos.

En lo que se refiere a maderas de destino pulpable, la “especialidad” de Uruguay es la producción de *Eucalyptus globulus*, pero en la actualidad la misma se concentra en las zonas sur y este del país, mientras que en el resto del país predomina el *Eucalyptus grandis*, y está creciendo fuertemente el área plantada con *Eucalyptus dunii*.

La legislación vigente en materia forestal

La Ley vigente y sus incentivos se encuentran en la página web del MGAP. Un aspecto importante es que la misma crea la figura del Registro de Bosques y la posibilidad del “derecho de superficie” o sea, que se permite separar desde un punto de vista jurídico el “vuelo” del “suelo”, facilitando diferentes tipos de operaciones.

Solamente se mantienen incentivos de exoneración de impuesto a la renta en el caso que los bosques sean calificados como “de calidad”. Esta calificación responde a cualquiera de las especies plantadas, siempre que sean manejadas a turno largo, con un fin previsto de aprovechamiento final para industrias de procesamiento primario de la madera.

Todo proyecto forestal deberá ser presentado ante la Dirección General Forestal de acuerdo a un formato preestablecido. Si la forestación supera las 100 has, deberá presentarse ante la Dirección Nacional de Medio Ambiente, para obtener su autorización. Como aspectos formales, el productor deberá presentar justificación legal de la propiedad de la tierra (certificados notariales y planos de mensura) y para la calificación de suelos, se parte de la base de la “clasificación CONEAT” que si bien se encuentra a disposición de todos los interesados por intermedio de la página web del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, debe oficializarse mediante la expedición de la información oficial.

Empresas forestales

En la actualidad, luego de procesos fuertes de adquisición y fusión, existe algo más de 1 millón de hectáreas, de las cuales, aproximadamente un 30% es gestionado por dos empresas: Forestal Oriental (UPM) y Montes del Plata

(Stora, Enso y Arauco). Además de adquirir tierras, estas empresas han realizado contratos de arrendamientos de los cuales el más importante es el de FOSA y Caja de Jubilaciones y Pensiones de Profesionales Universitarios y una adquisición en el NE, de 25.000 has.

Si bien inicialmente estas dos empresas operaban en el litoral W del país, en la actualidad se han desplazado al NE, Este y Centro del país, debiendo incluir programas logísticos especiales para el transporte de la madera.

Un 15 % aproximadamente es manejado en forma intensiva para producción de madera para transformación mecánica: se destacan Weyerhaeuser, Fymnsa y COFUSA, las tres con plantaciones en el Norte, y en el caso de Weyerhaeuser también en el noreste (Cerro Largo y Treinta y Tres).

Industrialización

Las industrias existentes en Uruguay son pocas, pero de alta tecnología. Ellos se debe fundamentalmente a la edad de los bosques (la madera que se procesa con destino de fabricación de tableros y maderas aserradas es fundamentalmente de raleos) pero los productos se colocan en mercados externos (el mercado interno es insignificante y normalmente abastecido por pequeños aserraderos).

Existen 2 aserraderos de gran tamaño: Fymnsa (pinos, Rivera) y URUFOR (eucalipto, Rivera), 4 de tamaño medio (Tingelsur S.A. en Zona Franca de Rivera, Forestal Caja Bancaria en Paysandú, Maserlit y Agüia en Río Negro). Dos fábricas de tableros contrachapados en Tacuarembó (Weyerhaeuser Productos y Urupanel). Una fábrica de MDF (Urupanel). Una fábrica de celulosa de 1 millón de toneladas/año- UPM. En construcción una fábrica de celulosa de 1,3 millones de toneladas/año (Montes del Plata).

Las fábricas de papeles y cartones están ubicadas en el Departamento de Colonia (FANAPEL), Soriano (Pamer) y Canelones (Ipusa). La citada anteriormente, fue adquirida por el grupo CMPC y ha incorporado maquinaria para papel tisú, incrementando su participación en el mercado.

En los últimos 3 años, y a partir de la puesta en funcionamiento de la fábrica de celulosa de UPM, la generación de energía a partir de biomasa forestal ha cobrado impulso. A la citada planta, se han unido centrales de cogeneración en Weyerhaeuser y Urufor (Bioener) y se está construyendo otra en Fymnsa. Existen plantas que utilizan biomasa forestal pero no la producen, Fenirol en Tacuarembó y Liderat en Paysandú.

Varias empresas están evaluando la generación, ya sea en forma paralela con sus procesos industriales (Forestal Caja Bancaria y Tingelsur) como con abastecimiento externo de biomasa.

Exportaciones

Las exportaciones de productos forestales han tomado un lugar importante en la economía uruguaya; en el gráfico siguiente, se muestra la evolución, conjuntamente con los otros dos sectores de importancia

Las exportaciones han evolucionado de madera rolliza, a productos de alto valor agregado, como es la celulosa, y en los próximos años, se espera que esta tendencia sea creciente, tal como lo muestra el cuadro siguiente, correspondiente al año 2010

La sostenibilidad de la producción forestal uruguaya

La política forestal seguida por Uruguay para el desarrollo del sector forestal, conjuntamente con la gran experiencia de sus principales empresarios, ha asegurado un manejo forestal sustentable que merece la aprobación con los más altos estándares internacionales. Prácticamente toda la producción forestal uruguaya y sus industrias han sido certificadas por FSC, pero además, día a día se incorporan aprovechamientos ganaderos, apícolas, resinas, producción de aceites esenciales de hojas de eucalipto, que implican la prueba más tangible de la sostenibilidad de esta producción.

Desde el punto de vista social, el desarrollo forestal ha incorporado al mercado de trabajo del interior de Uruguay a numerosos trabajadores que se han capacitado y formado empresas, con un contexto legal que asegura las mejores condiciones de trabajo.

AP.2 – Otros productos de ingeniería

Se define productos de ingeniería de la madera a aquellos que están formados por piezas más pequeñas de madera para formar compuestos más estables y resistentes que la suma de las piezas. La madera en sí propia presenta buenas propiedades como material para la construcción debido a las propiedades explicitadas en capítulos anteriores entre la que se destacan su bajo peso en relación a sus propiedades mecánicas. Cuando se trabaja con productos de ingeniería, a estas propiedades se le suman las propias de estos. Entre ellas se encuentran: aumento de resistencia, versatilidad de diseño, reducción de patologías de la madera, disminución de las pérdidas de material, etc. Entre estos productos se encuentran los que siguen.

Madera microlaminada

La madera microlaminada consiste en la elaboración de piezas estructurales a partir de la superposición de láminas de madera de entre 2 y 4 mm de espesor encoladas y prensadas en moldes especiales, dando origen a las piezas que se necesitan en tamaño y forma. Este es un producto final muy mejorado tanto en características técnicas como de forma, consiguiendo mejores resultados específicos.

La madera microlaminada aporta:

1. Mayores resistencias estructurales para las mismas escuadrías
2. Menor velocidad de carbonización en caso de incendio.
3. Mayor resistencia al agua y humedades.
4. Inmejorable comportamiento ante xilófagos.
5. Menor conductibilidad térmica (Mayor ahorro energético).
6. Perfección de escuadrías (Mayor perfección de ejecución y menor desperdicio).
7. Mejor condición de almacenamiento. (No tuerce o deforma en condición de almacenaje).

Tablero contrachapado

El tablero contrachapado, también conocido como multilaminado, triplay o madera terciada, es un tablero elaborado con finas chapas de madera pegadas con las fibras transversalmente una sobre la otra con resinas sintéticas mediante fuerte presión y calor. Esta técnica mejora notablemente la estabilidad dimensional del tablero obtenido respecto de madera maciza.

Se elabora mediante un proceso donde los troncos de madera se montan en una máquina que los hace rotar para realizar el corte, a fin de generar una hoja de chapa, que se corta a las medidas apropiadas. Luego, esta chapa se procesa en un horno para madera, se parchea o arregla en sus eventuales imperfecciones y, finalmente, se pega a presión y a una temperatura de aproximadamente 140 °C, formando así el tablero de contrachapado. Estos tableros se pueden cortar, parchear, pulir, etc. Es un tipo de material totalmente inodoro, pues se recubre con ácido sulfúrico tras ser fabricado.

Suelen hacerse tableros de pino y abeto para uso industrial y la construcción. Asimismo se pueden realizar tableros enchapados con maderas decorativas (como el roble rojo, abedul, etc.) y otras maderas duras.

Los tableros para usos interiores suelen presentar una resistencia limitada a la humedad, mientras que existen tableros en los que se usa pegamentos especiales basados en fenol-formaldehído, capaces de resistir el ataque de

hongos y prevenir el hoqueo de las capas del material, muy aptos para ambientes exteriores y en especial para encofrados de hormigón.

Tablero de fibras

Un tablero de fibras es un aglomerado elaborado con fibras de madera (que previamente se han desfibrado y eliminado la lignina que poseían) pegadas con resinas sintéticas mediante fuerte presión y calor, en seco, hasta alcanzar una densidad determinada; media si se habla de MDF o alta si se trata de HDF.

Presenta una estructura uniforme y homogénea y una textura fina que permite que sus caras y cantos tengan un acabado perfecto. Se trabaja prácticamente igual que la madera maciza, pudiéndose fresar y tallar en su totalidad. La estabilidad dimensional, al contrario que la madera maciza, es óptima, pero su peso es muy elevado. Constituye una base excelente para las chapas de madera. Es perfecto para lacar o pintar. También se puede barnizar (aunque debido a sus características no es necesario). Se encola fácilmente y sin problemas. Suele ser de color marrón medio-oscuro y es un tablero de bajo coste económico en el mercado actual.

Es recomendable para construir muebles (funcionales o artísticos) que no deban soportar grandes pesos. Sin embargo, no es apto para exterior ni condiciones húmedas aunque existen algunos que llevan un tratamiento antihumedad (hidrofugo). Debido a estas propiedades, no debe ser utilizado como material de construcción.

Madera reconstituída

Se trata de madera que se ha reconstituido artificialmente. Se obtiene aplicando calor y presión a piezas de madera en distintos formatos, que previamente se han encolado y orientado, para obtener tableros (donde predominan su anchura y longitud frente a su espesor) o perfiles (donde predomina su longitud frente a la anchura y espesor) de madera reconstituída. Los formatos utilizados normalmente suelen ser restos de chapas o tiras o virutas de madera, aunque se pueden utilizar otros; en las que predomina su longitud frente a las dimensiones de su sección transversal.

Algunos tipos se han destinado a construcción y estructuras mientras otros se destinan a carpintería y mobiliario dependiendo de la especie utilizada, de los adhesivos y de las propiedades finales del producto.

Tablero de hojuelas orientadas (OSB)

El OSB es una placa estructural que posee buena resistencia físico-mecánica, resistencia de arranque a tornillos y posibilidad de pintura equivalente a los otros paneles estructurales. Otra característica es la calidad interna, superior a la del aglomerado, ya que no tiene nudos ni huecos. En el aglomerado multilaminado, que es el producto más similar en cuanto a su utilización, son comunes las fallas y densidades diferentes en el interior que pueden comprometer la resistencia a la ruptura y a la elasticidad, además de influir en la estabilidad del panel. El OSB posibilita trabajar con grosores menores para una resistencia similar o superior. En lo que tiene que ver con resistencia a la acción del agua, el OSB es similar al tablero de fibras en relación al descolamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- “Science and technology of wood: Structure, properties, utilization” – George Tsoumis - 1991
- “Compendio de directrices para enseñanza en ingeniería” - Centro de Transferencia Tecnológica Pino Radiata - PROYECTO CORFO-FONTEC -Noviembre 2003 (Link: <http://www.cttmadera.cl/wp-content/uploads/2007/04/comp-ing.pdf>)
- “Características de la forestación en Uruguay - Aspectos técnicos, empresariales del desarrollo forestal a mayo del año 2011” - Ing. Rosario Pou. (Link: <http://www.uruguayforestal.com/informes/Forestacion%20en%20Uruguay-2011.pdf>)
- “Diseño y ensayo de uniones paracerchas de madera” - Raul Andres vargas arangua (Link: http://es.scribd.com/fercho_mariscal/d/88873028/17-Factores-que-Influyen-en-la-Adhesion)
- “Tecnología de la Madera” - Santiago Vignote Peña, Isaac Martínez Rojas - 3ª Edición 2006 (Link: http://books.google.com.uy/books?id=tmY5Z1WVFGwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- “Física de la madera” - Ruben Ananias - Universidad del Biobio, Chile (Link: http://zeus.dci.ubiobio.cl/~ananias/apuntes_fisica_madera.pdf)
- Diapositivas Madera – Curso “Materiales y ensayos” – Daniel Godoy