



FACULTAD DE
CIENCIAS FORESTALES
Ing. Néstor René Ledesma



UNSE
Universidad Nacional
de Santiago del Estero

CÁTEDRA DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA

FUNDAMENTOS TEÓRICOS-PRÁCTICOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA



Parte 1

Propiedades físicas



9 789878 922133

Equipo docente Ing. Maximiliano Umlandt / Ing. Vanesa Jiménez /
Mgter. Feliza Benítez / MSc. Ing. Estela Pan /
Dr. Ing. Juan Carlos Medina / Ing. Agustín Ruiz /
Sr. Leandro Fernández /Sr. Álvaro Ludueña

Mayo 2022

Fundamentos teóricos-prácticos de las propiedades físicas mecánicas de la madera :
cátedra de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera / Maximiliano Umlandt .
[et al.]. - 1a ed - Santiago del Estero : Universidad Nacional de Santiago del Estero

-
UNSE. Facultad de Ciencias Forestales, 2022.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-8922-13-3

1. Madera. 2. Propiedades de la Madera. I. Umlandt, Maximiliano
CDD 575.46

FUNDAMENTOS TEÓRICOS-PRÁCTICOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA

(Propiedades Físicas- Parte 1)

Cátedra de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera

Santiago del Estero - Mayo 2022



FACULTAD DE
CIENCIAS FORESTALES
Ing. Néstor René Ledesma



Universidad Nacional de Santiago del Estero

Rector Ing. Héctor **Paz**

Vicerrectora Lic. Hilda Marcela **Juárez**

Facultad de Ciencias Forestales

Decano Dr. Juan Carlos **Medina**

Vicedecana Dra. Amelia Nancy **Giannuzzo**

Instituto de Tecnología de la Madera

Director Instituto de Tecnología de la Madera Ing. Agustín **Ruiz**

Directora Departamento de Industrias Ing. María Elena **Carranza**

Director de Escuela de Industrias Ing. Rolando **Schimpf**

La presente Serie Didáctica es un documento elaborado por la cátedra de *Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera*, Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Forestales, y tiene como objetivo desarrollar los contenidos a partir de los cuales los estudiantes puedan comprender y relacionar las características y propiedades del material madera, con los posibles usos y aplicaciones tecnológicas e industriales para la obtención de productos madereros de alto valor.

Este documento se concibe con la intención de generar una herramienta didáctica, que contribuya a la formación de los estudiantes de la Carreras de Ingeniería Forestal, Ingeniería en Industrias Forestales, y Técnicos Universitarios en Aserraderos y Carpintería Industrial, de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Los contenidos de esta Serie Didáctica son de carácter introductorios, y deben necesariamente complementarse con la bibliografía sugerida en la planificación de la asignatura (disponible en la web de la FCF-UNSE).

Los temas tratados en este documento están volcados de manera deliberada para generar una integración horizontal y vertical con otras cátedras de las carreras antes mencionadas, en las cuales se imparten contenidos relacionados a los procesos de aserrado, secado, preservación, carpintería y construcciones con madera.

Autores:

Maximiliano Umlandt; Vanesa Jiménez; Feliza Benitez; Estela Pan; Juan Carlos Medina; Agustín Ruiz; Leandro Fernández y Álvaro Ludueña.

Índice

| | |
|---|---------|
| INTRODUCCIÓN | Pág. 5 |
| Constitución de la madera. | Pág. 8 |
| Química de la madera. | Pág. 11 |
| Principales componentes de la madera | Pág. 11 |
| La celulosa | Pág. 13 |
| Pared celular | Pág. 15 |
| Planos anatómicos de corte. | Pág. 18 |
| Toma de muestras para determinación de propiedades físicas y mecánicas. | Pág. 18 |
| PESO ESPECÍFICO | Pág. 21 |
| Peso específico real. | Pág. 22 |
| Peso específico aparente. | Pág. 22 |
| Relación del peso específico y humedad. | Pág. 25 |
| Factores que influyen en la variación del peso específico de la madera . | Pág. 26 |
| Determinación del peso específico. | Pág. 28 |
| Ejercicios de aplicación: peso específico. | Pág. 31 |
| HUMEDAD DE LA MADERA | Pág. 40 |
| Expresiones del contenido de humedad. | Pág. 41 |
| Determinación del contenido de humedad. | Pág. 43 |

| | |
|--|---------|
| Condiciones de la madera según su contenido de humedad. | Pág. 50 |
| Humedad relativa, humedad absoluta, humedad de equilibrio higroscópico, PSF y MCH. | Pág. 52 |
| Gradiente de humedad de la madera. | Pág. 56 |
| Variación de la humedad en el árbol. | Pág. 57 |
| Ejercicios de aplicación: humedad. | Pág. 57 |
| SORCIÓN EN MADERAS | Pág. 62 |
| Concepto y tipos de sorción en madera. | Pág. 62 |
| Histéresis de sorción. | Pág. 65 |
| Determinación experimental de las isotermas de sorción. | Pág. 68 |
| CONTRACCIÓN E HINCHAMIENTO | Pág. 72 |
| Determinación de la contracción e hinchamiento de la madera. | Pág. 73 |
| Contracción e hinchamiento volumétrico máximo. | Pág. 75 |
| Contracciones e hinchamientos lineales. | Pág. 76 |
| Fórmulas de hinchamiento y contracción volumétrica en maderas. | Pág. 78 |
| Coefficiente de contracción diferencial y de hinchamiento diferencial. | Pág. 79 |
| Anisotropía de la contracción y del hinchamiento. | Pág. 81 |
| Determinación del Punto de Saturación de las Fibras (PSF). | Pág. 82 |
| Efecto de la contracción en la calidad de la madera. | Pág. 83 |
| Determinación de las contracciones totales y del punto de saturación de las fibras. | Pág. 85 |

Ejercicios de aplicación: contracción e hinchamiento. Pág. 88

PROPIEDADES TÉRMICAS, ELÉCTRICAS Y ACÚSTICAS

DE LA MADERA Pág. 91

PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA MADERA Pág. 92

Dilatación. Pág. 93

Capacidad térmica y calor específico. Pág. 95

Poder calorífico de la madera. Pág. 98

Coefficiente de difusibilidad térmica. Pág. 99

Conductividad calorífica o térmica de la madera. Pág. 99

Resistencia al fuego. Pág. 102

Etapas en la combustión de la madera. Pág. 103

PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LA MADERA Pág. 105

Resistencia eléctrica de la madera. Pág. 106

Comportamiento dieléctrico de la madera. Pág. 108

PROPIEDADES ACÚSTICAS DE LA MADERA Pág. 110

BIBLIOGRAFIA Pág. 115

INTRODUCCIÓN

¿Qué es la madera?

INTRODUCCIÓN

¿Qué es la madera?

Existen numerosas definiciones y conceptos respecto de la madera, pero iniciaremos proponiendo lo indicado por la Norma IRAM 9502, la cual se refiere a la madera como un material de estructura compleja y de carácter anisotrópico que forma el tejido leñoso o parte subcortical del árbol abatido, fisiológicamente inactivo.

Desde la Cátedra de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera, se propone a la madera como un material orgánico, poroso, heterogéneo, anisotrópico e higroscópico. Por material orgánico hace referencia a que la madera se encuentra formada por moléculas orgánicas, que son aquellas que contienen carbono.

La porosidad en la madera, hace referencia a la presencia de espacios vacíos en el volumen del material, otorgándole la capacidad de absorber líquidos y gases.

La madera es un material heterogéneo porque está compuesto por más de un tipo de células.

La higroscopicidad es la capacidad de un material para absorber o ceder humedad al medio en el que se encuentra en función de la humedad relativa de ese ambiente, hasta alcanzar el equilibrio.

La anisotropía de la madera es la característica por la cual sus propiedades varían según la dirección que se considere. En la figura 1, se observan las 3 direcciones principales, longitudinal, radial y tangencial. Esta característica se desarrollará más adelante.

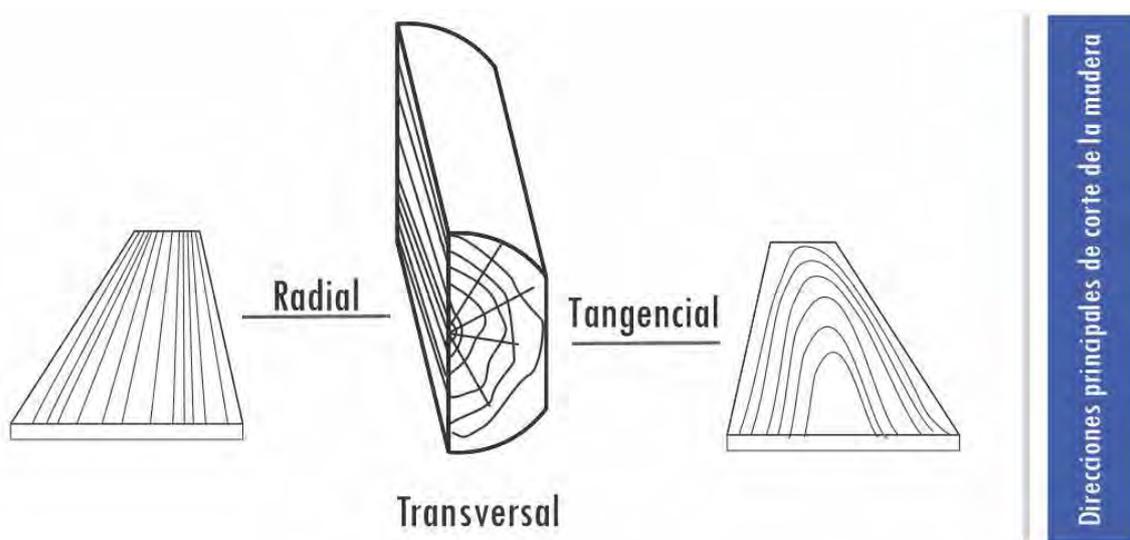


Figura 1. Direcciones principales de corte de la madera

Otras características destacables la madera son:

- Es un material biodegradable,
- Es combustible,
- Con el uso de preservantes se puede aumentar la durabilidad natural,
- Es relativamente inerte a la acción química,
- A bajos contenidos de humedad se comporta como aislante eléctrico, acústico y térmico.



¿Por qué estudiar las propiedades/características de las maderas?

El conocimiento de los materiales, y en este caso de la madera, permite proponer el uso más apto o aquellas funciones en la que mejor se desempeñarán, permitiendo, además comparar entre si las distintas especies de maderas, como así también comparando cada una de ellas con otros materiales, tales como metales, hormigones, etc.

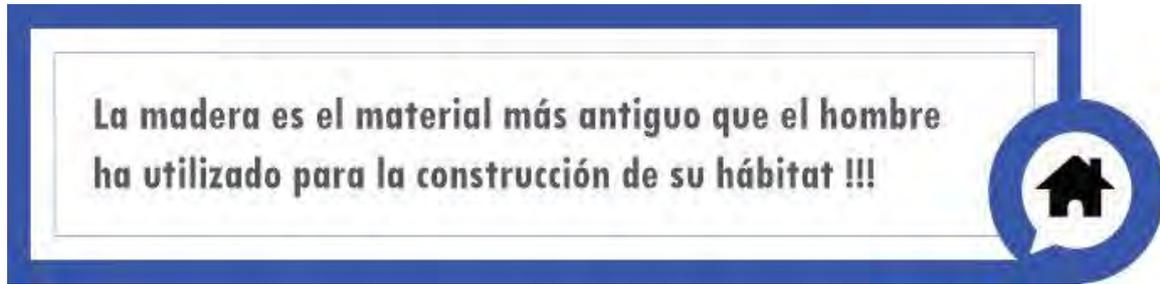
Es importante entender que, aunque un material como la madera puede ser utilizado de diferentes maneras cumpliendo diferentes funciones y responder muy bien, existe la posibilidad que otro material debido a sus propias características resulte ser mejor opción. No obstante, esa decisión no se toma únicamente en base a las características físicas y mecánicas de los materiales, también intervienen cuestiones como el diseño, los costos, aspectos culturales, disponibilidad del material en el lugar, etc.

En este trabajo nos abocaremos pura y exclusivamente a las propiedades físicas y mecánicas de la madera, de manera que, en términos de productos de calidad, podamos proponer grupos de maderas o alguna especie en particular, para que puestas en uso (y/o los productos que de ellas se obtengan) se comporten según los estándares de calidad esperados para tal fin, como por ejemplo su comportamiento para el corte, mecanizado, trabajabilidad, acabado, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, estabilidad dimensional, etc.

Recordemos que calidad es un conjunto de propiedades inherentes a un objeto que permiten caracterizarlo y compararlo con otros, ya sea porque son de la misma naturaleza, y/o, por el tipo de función que se espera que cumplan.

La calidad de la madera es el resultado de la caracterización tecnológica de la madera de un árbol, a partir de sus propiedades anatómicas, propiedades físicas, propiedades

mecánicas y propiedades químicas; para lograr una correcta y adecuada utilización del material y de los productos que se obtengan de ella.



Durante miles de años la madera se utilizó como combustible, materia prima para la fabricación de papel, mobiliario, construcción de viviendas y una gran variedad de utensilios para diversos usos.

A continuación, en la figura 2, se presenta un diagrama en el cual se indican y clasifican las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

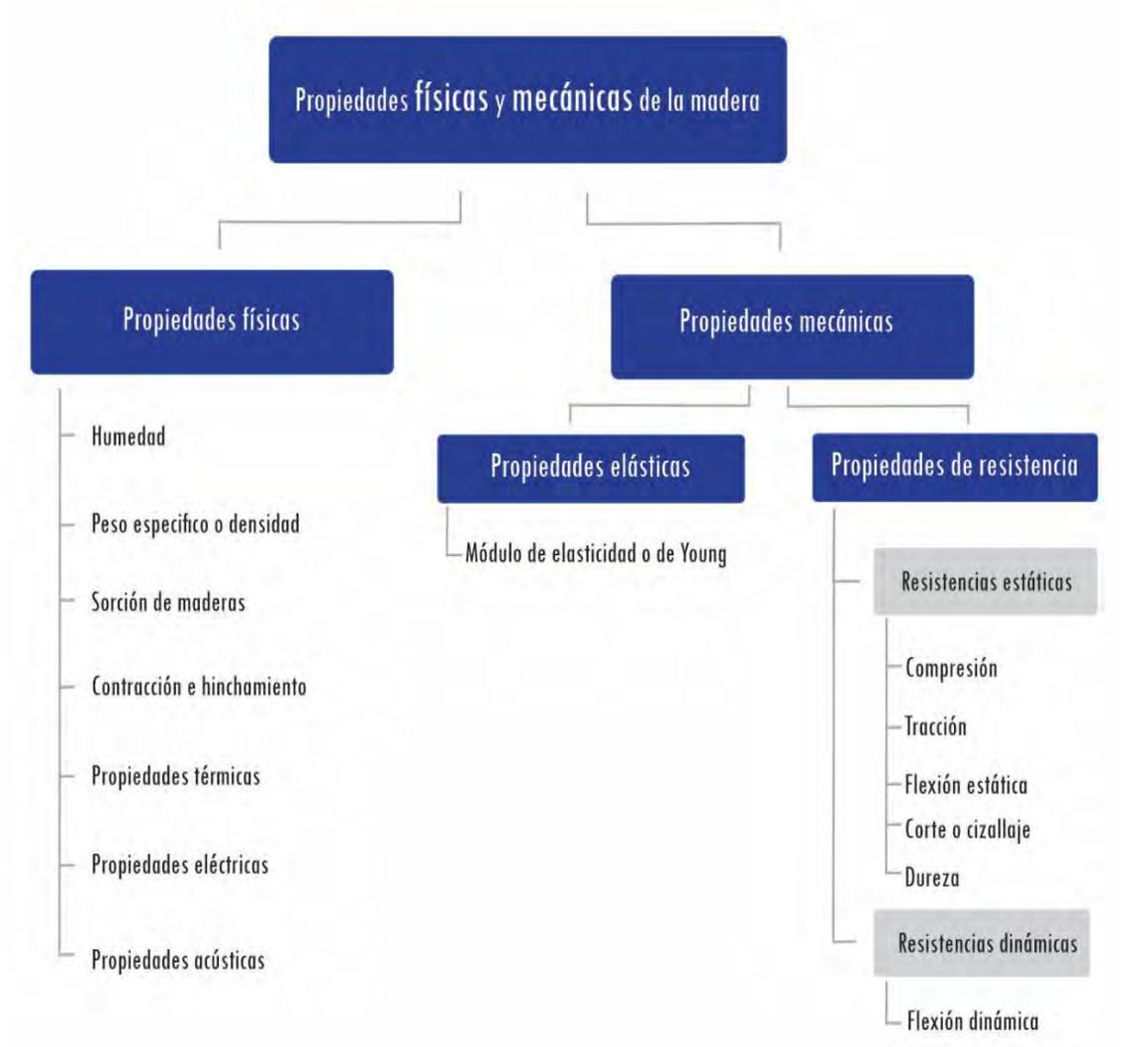


Figura 2. Clasificación de las propiedades de la madera.

Autores: Maximiliano Umlandt; Vanesa Jiménez; Feliza Benítez; Estela Pan; Juan Carlos Medina; Agustín Ruiz; Leandro Fernández y Álvaro Ludueña.

A modo de ejemplo sobre la importancia de la calidad de los productos madereros en función de sus aplicaciones y características tecnológicas, podemos mencionar que en Santiago del Estero dos especies utilizadas comúnmente para la construcción son el **Quebracho colorado** o *Schinopsis lorentzii* (Griseb.) Engl.; y el **Quebracho blanco** o *Aspidosperma quebracho-blanco* Schlecht, y es en base a las características que presenta cada uno, y asegurando la calidad de la construcción, que al quebracho colorado se lo utiliza para columnas y otras aplicaciones en la que esté mayormente sometido a esfuerzos de compresión, mientras que al Quebracho blanco se lo utiliza para vigas y otras aplicaciones en la que se encuentre sometido a esfuerzos de flexión. Esto se debe a que el primero se caracteriza por ser una madera del tipo rígida, mientras que el último se caracteriza por ser una madera flexible.

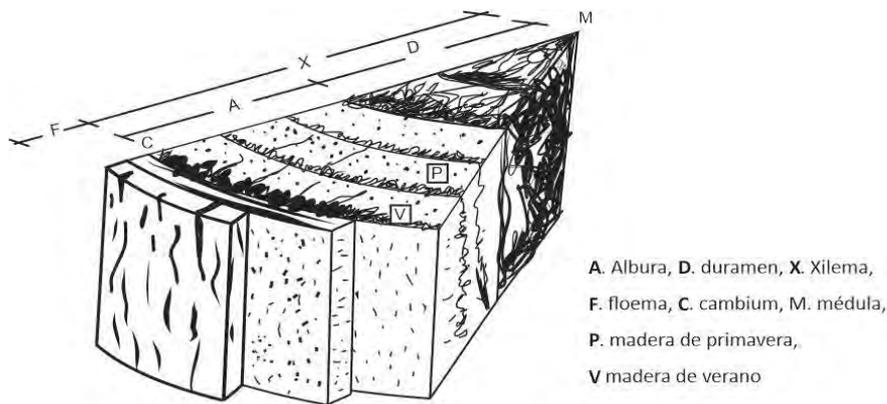
Por su lado, el algarrobo (*Prosopis alba* Griseb. var. *alba*) es considerado una de las maderas más nobles que se pueden obtener del monte Santiagueño para la fabricación de muebles y aberturas, y ello es atribuible a su estabilidad dimensional, puesto que los carpinteros y artesanos de la región mencionan que la madera no se mueve, haciendo referencia a que no se deforma, o como también indican "la madera no trabaja" una vez finalizada la construcción de los productos que de esta madera se elaboran.

Constitución de la madera

La madera es una sustancia dura y resistente que constituye el tronco de los árboles. La madera está atravesada por dos grupos de células, un grupo lo hace de manera longitudinal desde las raíces hasta la copa del árbol, y el segundo grupo lo hace de manera transversal desde la médula hacia la corteza.

Uno de los distintos tipos de células presentes en la madera, contiene pequeños tubos dispuestos verticalmente que forman el principal sistema conductor o circulatorio de los árboles. De acuerdo a la forma de conducción se divide en dos clases:

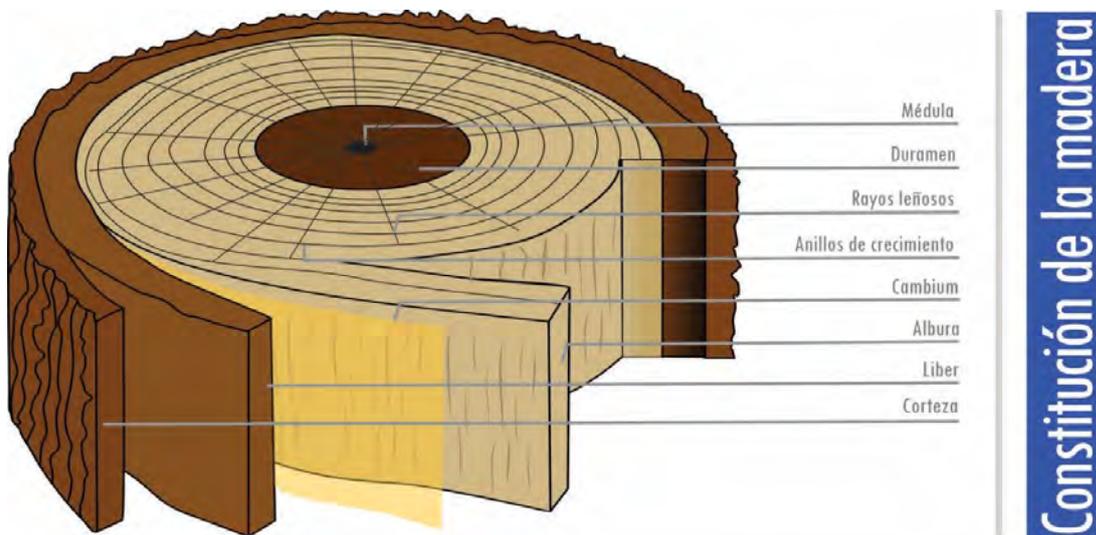
- Xilema o vasos leñosos: conducen la savia bruta, agua y sales minerales disueltas desde las raíces a las hojas. Figura 3.
- Floema o vasos liberianos: donde circula en estado de disolución la savia elaborada en las hojas para alimentar al resto de la planta. Figura 3.



Esquema sección de madera

Figura 3: Esquema de un trozo de madera en donde se indican sus componentes. Fuente Kollmann (1959)

El crecimiento de los árboles se produce debido a la presencia de meristemas, tejidos dotados de la capacidad de producir nuevas células. El meristema apical es el responsable del crecimiento en altura y representa una porción ínfima del árbol; se localiza en ápice del tronco o ramas (Gimenez et al., 2000, citados por Pan et al., 2009). El crecimiento del tronco en espesor o diámetro, se debe al meristema cambial, tejido formado por una o algunas capas de células que se localizan entre el floema (corteza interna) y la albura (Gimenez et. al., 2000). Figura 4. El cambiun vascular es la capa de células en activa división que originan xilema y floema.



Constitución de la madera

Figura 4. Partes constitutivas de la madera.

Una manera de clasificar las maderas es en dos grandes grupos, pesadas (duras) y livianas (blandas). Las pesadas pertenecen a las maderas de angiospermas, conocidas también como latifoliadas o frondosas, y también denominada madera de árboles de hoja caduca. Las maderas livianas están incluidas dentro de las gimnospermas o coníferas.

Autores: Maximiliano Umlandt; Vanesa Jiménez; Feliza Benítez; Estela Pan; Juan Carlos Medina; Agustín Ruiz; Leandro Fernández y Álvaro Ludueña.

Entre las maderas pertenecientes a estos dos grandes grupos existen notables diferencias en sus estructuras.

Las latifoliadas poseen células conductoras denominadas vasos, los cuales están conformados en series verticales formando una tubería que se extiende verticalmente a lo largo del árbol, mientras que en las coníferas el transporte del agua es función de las traqueidas (Fernández Golfín - Seco y Álvarez - Noves, 1998 citados por Pan *et al.*, 2009).

A continuación se presenta la tabla 1 con las características más importantes para destacar del leño de angiospermas y gimnospermas.

Tabla 1. Principales características del leño de angiospermas y gimnospermas.

| Características | Gimnospermas | Angiospermas |
|--|--|--|
| Elementos de conducción. | Traqueidas. | Traqueidas y vasos. |
| Elementos de sostén. | Fibras. | Fibras libriformes y tabicadas. |
| Almacenamiento y transporte a corta distancia. | Parénquima axial escaso y canales resiníferos. | Parénquima axial paratraqueal o apotraqueal. |
| Rádios. | Uniseriados. | Uni-pluriseriados. |

Fuente: Monteoliva. (2015).

En la figura 5 se esquematizan gráficamente los distintos elementos celulares del leño de angiospermas y gimnospermas.

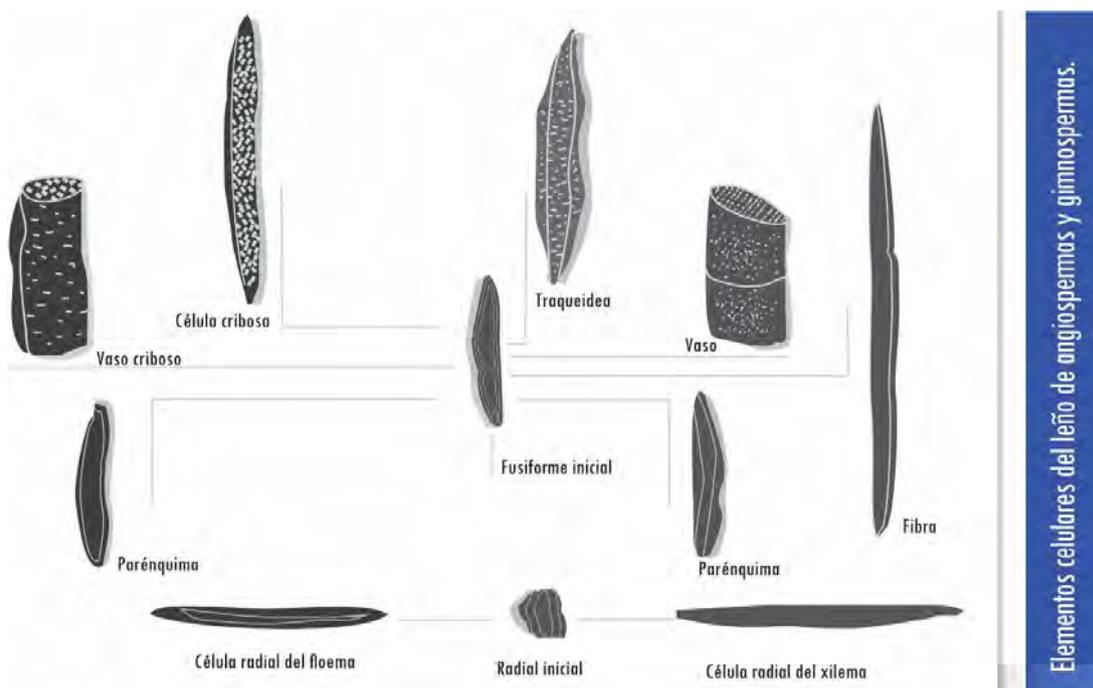


Figura 5. Elementos celulares del leño de angiospermas y gimnospermas. Fuente: Monteoliva. (2015).

Química de la madera

Los principales elementos químicos de la madera son idénticos en las diferentes especies leñosas (Tabla 2 y 3). Contienen aproximadamente un 50 % de Carbono, un 6,1 % de Hidrógeno, un 45 % de Oxígeno, mientras que sólo hay una pequeña parte compuesta de Nitrógeno (0,04 a 0,26 %). También se encuentran presentes elementos minerales que constituyen las cenizas (Calcio, Potasio y Magnesio).

Tabla 2. Principales elementos químicos de la madera anhidra.

| Elemento químico | Porcentaje (%) |
|------------------|----------------|
| Carbono | 49 a 50 |
| Oxígeno | 43 a 44 |
| Hidrógeno | 6 |
| Nitrógeno | 0,2 a 0,5 |

Tabla 3. Principales elementos químicos de la madera con un % de humedad.

| Elemento químico | Porcentaje (%) |
|------------------|----------------|
| Carbono | 50 |
| Oxígeno | 45 |
| Hidrógeno | 6,1 |
| Nitrógeno | 0,2 a 0,5 |

Principales componentes de la madera

La madera presenta una estructura celular en la que cada célula se caracteriza por poseer una cavidad central o lumen, y una pared compuesta por varias capas diferentes.

Los componentes principales de la madera son la celulosa, la hemicelulosa, y la lignina. Están presentes dentro de las paredes de las células (fibras, vasos y traqueidas) en las maderas de coníferas y latifoliadas. En la tabla 4 se indican los componentes químicos de la madera, su participación porcentual en la estructura de la pared celular y su función.

Tabla 4. Principales componentes químicos de la madera.

| Componente químico | Porcentaje (%) | Función |
|--------------------|----------------|--|
| Celulosa | 45 a 50 | Componente fundamental de la pared celular. Es un polisacárido que confiere resistencia y tenacidad. |
| Lignina | 20 a 30 | Polímero polifenólico, constituye el material cementante y proporciona rigidez. |
| Hemicelulosas | 20 a 25 | Heteropolisacáridos, es la matriz en la cual se enredan las fibras de celulosa. |

La celulosa y lignina forman casi la totalidad de las paredes de las fibras leñosas, y el resto de las paredes de la célula están compuestas por otros productos orgánicos cuyos porcentajes mínimos dependen de las especies de madera. Se los conoce como componentes secundarios de la madera y se los puede dividir en dos grandes grupos:

- Materiales de reserva: almidón, azúcares, grasas, taninos y sustancias albuminoideas.
- Materiales de secreción: aceites esenciales, materiales colorantes, sales minerales, ceras y resinas.

La función de los componentes secundarios es proteger la madera de los árboles del ataque de hongos e insectos y de enfermedades que pudieran producir.

Estos constituyentes secundarios, cuando están presentes, son los responsables de otorgarles a las maderas mayor resistencia natural a la pudrición, propiedades abrasivas, coloración particular, etc.

El tanino del Quebracho colorado es una compleja combinación de polifenoles y se obtienen por extracción acuosa del duramen de su madera. El tanino es un poderoso antioxidante y posee una significativa capacidad antibacteriana. Por sus características puede ser utilizado en diversas áreas industriales y alimenticias, como por ejemplo: curtientes vegetales, aditivos para cartones, aditivos para papeles, tratamientos superficiales, adhesivos, alimentación animal, entre otros.
(fuente: www.unitan.net/es-index.html).



En la figura 6 se presenta una clasificación de los componentes químicos de la madera de acuerdo a una agrupación de las sustancias propuesta por diversos autores.

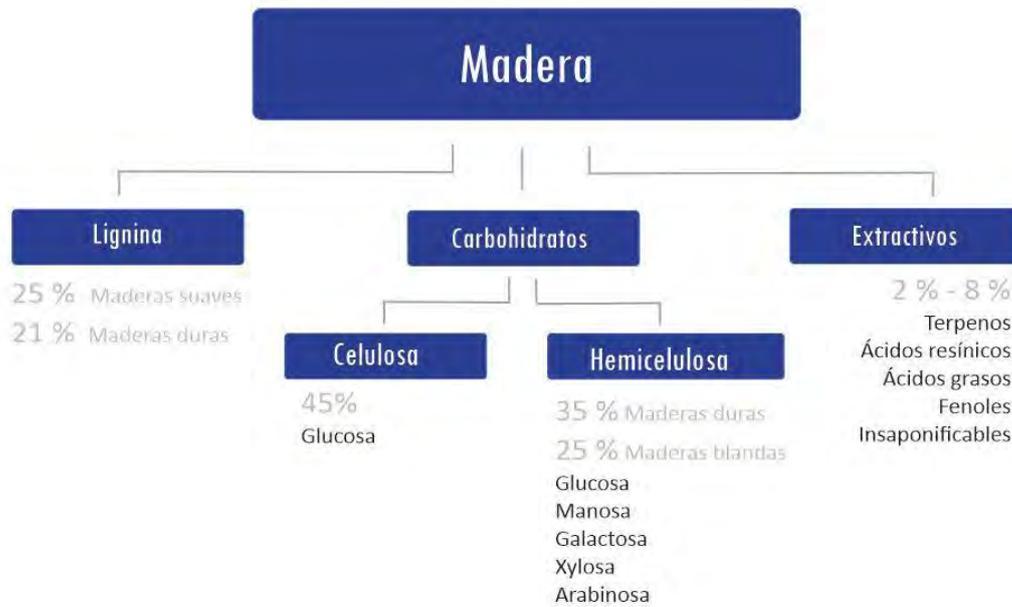


Figura 6. Componentes químicos y porcentajes aproximados de cada uno.

La celulosa

La molécula de celulosa está formada por unidades de β D glucopiranosas ligadas entre sí por puentes de oxígeno que unen los átomos de carbono 1 y 4 de cada dos consecutivos, formando una larga cadena como la que se muestra en la figura 7.

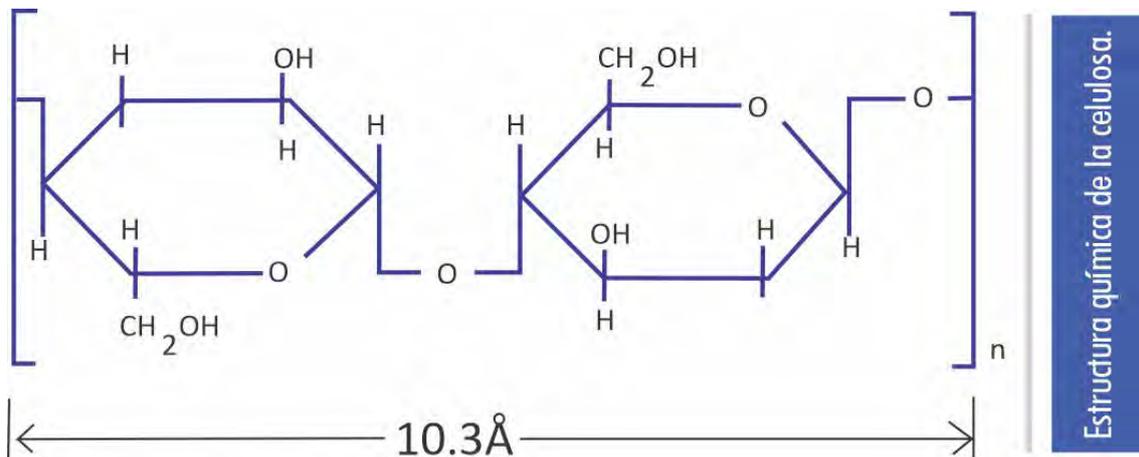
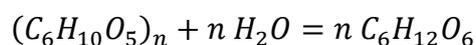


Figura 7. Estructura química de la celulosa. Fuente: Siau 1971

La fórmula estructural de la celulosa es:



La celulosa tiene una estructura molecular completamente lineal. Debido a su estructura fibrosa y sus fuertes uniones de hidrógeno, la celulosa es bastante estable y resistente a los solventes químicos.

Las moléculas de celulosa se unen formando una macromolécula donde cada cadena lineal elemental contiene aproximadamente 200 monómeros (glucosas), estando asociada a otras cadenas para formar microfibrillas y éstas la fibra celulósica. El grado de polimerización "n" de la celulosa varía entre 1000 a 3000 unidades de glucosa.

Las cadenas de celulosa se encuentran empaquetadas en una estructura perfectamente ordenada formando cristales de celulosa, los cuales se denominan como fibrilla elemental, micela celulósica, cristalita o cristalito.

En la figura 8 se pueden observar las dimensiones del cristal elemental de la celulosa, y su relación con los diversos elementos constituyentes de la pared celular en madera de coníferas (Siau, 1971).

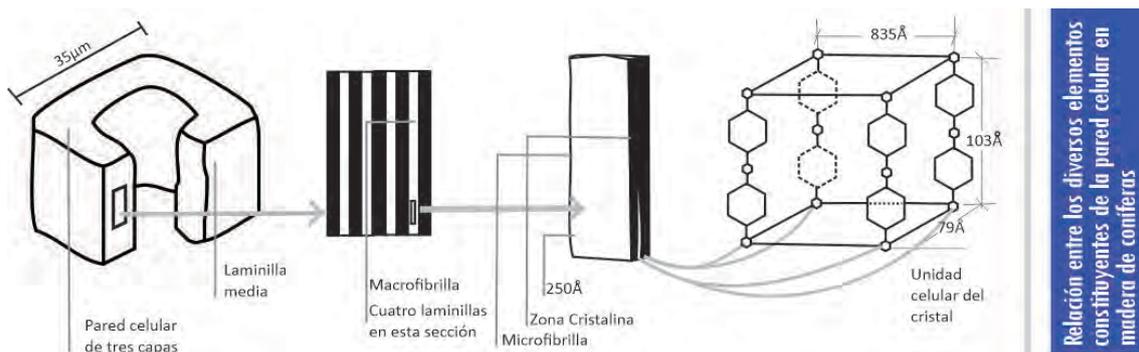


Figura 8. Relación entre los diversos elementos constituyentes de la pared celular en madera de coníferas. (Siau, 1971)

Pan et al (2009) explican que una vez formado el cristal celulósico quedan los extremos de la estructura reticular que no están ordenados como un cristal, que por diversas razones, no pueden incrustarse en la red cristalina, ya que las distancias laterales entre las cadenas son grandes como para que las fuerzas químicas de Van Der Waals las mantenga unidas, por lo que quedan separadas formando una estructura floja o amorfa. Como resultado, es observable dos zonas claramente diferenciadas una de otra:

- Zona cristalina o intramicelar: estas cavidades no son accesibles al ingreso del agua, solo a los ácidos y álcalis.
- Zona paracristalina, amorfa o intermicelar: estos espacios son accesibles al ingreso del agua.

En la figura 9 representa una microfibrilla en la que se pueden observar las dos regiones antes mencionadas, la amorfa y la cristalina.

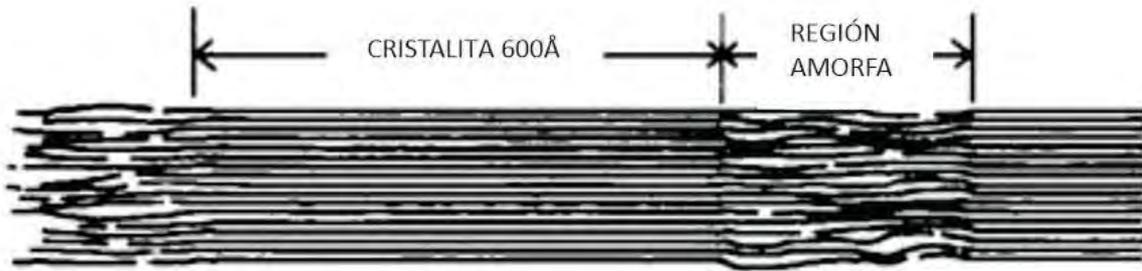


Figura 9. Estructura de la porción de una microfibrilla con zonas cristalinas y amorfas. Fuente: Siau 1971.

La fibrilla o cristal elemental de celulosa no posee características de material hinchante, mientras que una microfibrilla debido a su configuración presenta características de higoexpansión.

Esto solo es válido cuando el medio hinchante es el agua, pues cuando se trata de ácidos o álcalis, estos ingresan dentro de la micela verificándose un hinchamiento intracristalino o intramicelar.

Pared celular

La pared celular define la forma y tamaño a las células de las plantas y tiene una función mecánica, otorgándole a la planta la rigidez necesaria para mantenerse erguida sosteniendo su propio peso. La pared celular también cumple funciones de comunicación y transporte de agua entre las células.

Las microfibrillas de celulosa se agrupan entre sí con diferentes grados de paralelismo y separación interna dependiendo de la posición dentro de la pared celular conformando la misma. Como se muestra en la figura 10, en el proceso de formación de la pared celular, las microfibrillas de celulosa están embebidas dentro de una masa de lignina amorfa (Kerr and Goring, 1975; citado por Pan et al, 2009).

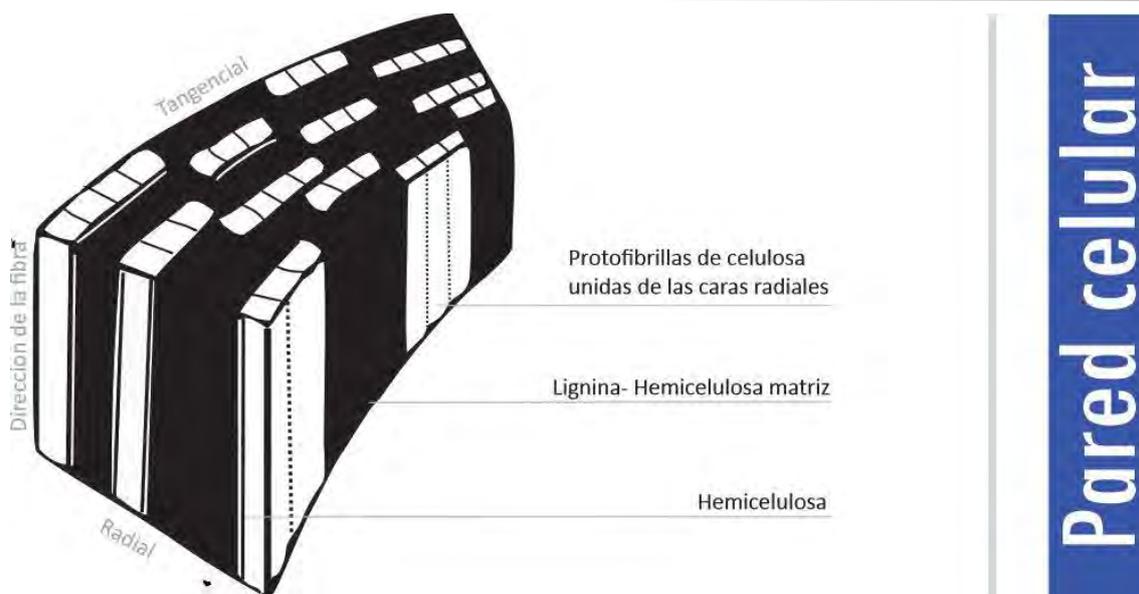


Figura 10. Microfibrillas embebidas dentro de una masa de lignina amorfa. Fuente: Kerr and Goring, 1975; citado por Pan et al, 2009.

La pared celular está conformada desde afuera hacia adentro por la laminilla media, pared primaria, pared secundaria y pared terciaria. Las células forman sus paredes celulares de afuera hacia adentro, razón por la cual, la pared primaria es más "vieja" que la pared terciaria.

- Laminilla Media: produce la separación entre células y limita con la pared primaria. Tiene un espesor de $0,2\mu$ a $0,3\mu$ y las microfibrillas de celulosa están orientadas aleatoriamente dentro de este tejido. Contiene altos porcentajes de pectinas y de lignina.

- Pared Primaria: limita hacia afuera con la laminilla media y hacia adentro con la capa S1 de la pared secundaria. El espesor de esta pared es casi constante en la madera de leño temprano y leño tardío, variando entre de $0,1\mu$ a $0,3\mu$. Las microfibrillas están entrelazadas disponiéndose aleatoriamente. Presenta altos porcentajes de pectinas y hemicelulosas.

- Pared Secundaria: esta pared se caracteriza por presentar tres capas, la capa S1, capa S2 y capa S3 o pared terciaria (Kollmann, 1963).

- Capa S1 o externa, el contenido de celulosa es 2,5% presentando altos porcentajes de lignina. En esta capa las microfibrillas están orientadas con respecto al eje longitudinal de las fibras desde 60° a 80° . Presenta un espesor de $0,2\mu$ a $0,5\mu$ en la madera de leño temprano y hasta 1μ en la madera de leño tardío.

- Capa S2 o central, es la de mayor espesor, variando desde 1μ a 2μ en la madera de leño temprano hasta 3μ a 8μ en la madera de leño tardío. La orientación de las microfibrillas en esta capa varía desde los 10° en la capa cercana a la S1 hasta 30° en las proximidades de la capa S3.

El contenido de celulosa es de 94%. Las microfibrillas se desarrollan en forma paralela por lo que adhieren más y se espesan. Existe una textura paralela, este hecho le confiere una alta anisotropía. Esta capa es la causante en mayor parte de la hinchazón o contracción radial y tangencial de la madera.

La capa S2 representa el 60% a 80% del total de la pared secundaria, por lo tanto, es la que presenta mayor influencia en el comportamiento de la madera ante el fenómeno de higroexpansión. En relación con esto, las capas S1 y S3 actúan restringiendo el movimiento de la capa S2, limitando el valor total del movimiento transversal de la madera.

- Capa S3 también llamada pared terciaria tiene un espesor de $0,1\mu$ a $0,2\mu$, permaneciendo su anchura constante en la madera de leño temprano y leño tardío. Las microfibrillas se disponen perpendicularmente al eje de las fibras. Esta capa es la más interna de la pared celular, limitando con el lumen a través de una capa verrugosa de pequeño espesor. Esta capa tiene una influencia notable en el fenómeno de la difusión de los líquidos a través de la pared celular.

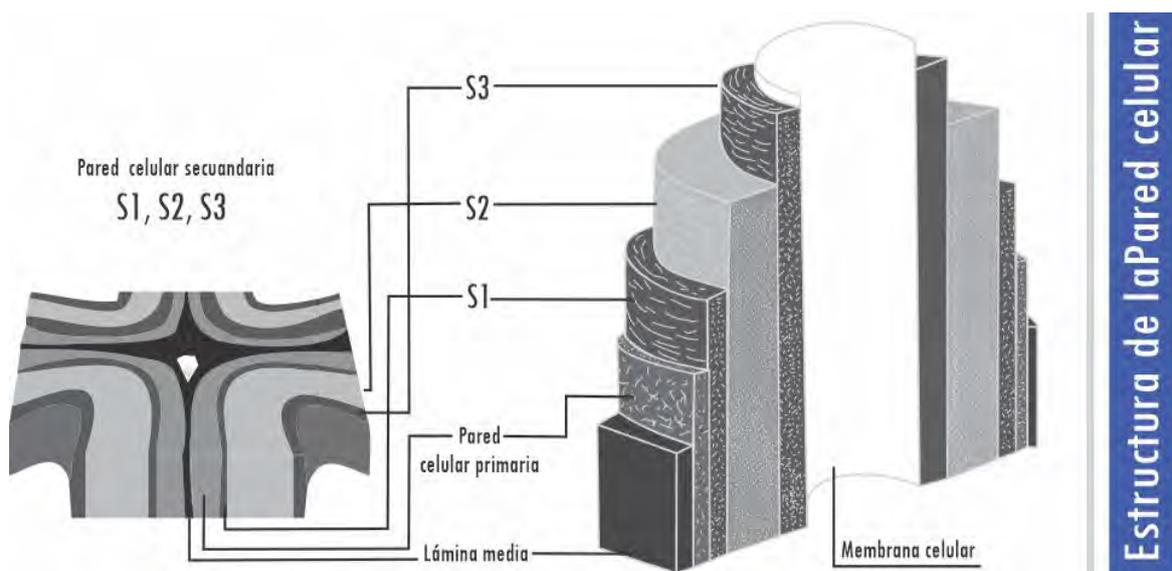


Figura 11. Estructura de la pared celular: S1, S2 y S3, Pared primaria y Lámina media. Fuente: Atlas de histología vegetal y animal (2021).

Planos anatómicos de corte

En la madera, por tratarse de un material heterogéneo y anisotrópico, sus propiedades varían de acuerdo con la sección o plano analizado.

Para estudios tecnológicos, en los cuales establece las características y comportamiento de la madera en determinadas condiciones de uso, se adoptan tres planos convencionales de corte.

- Corte transversal: perpendicular al eje del tronco.
- Corte radial: perpendicular a la tangente del anillo de crecimiento y al conducto medular.
- Corte tangencial: tangente a los anillos de crecimiento y perpendicular a los radios.

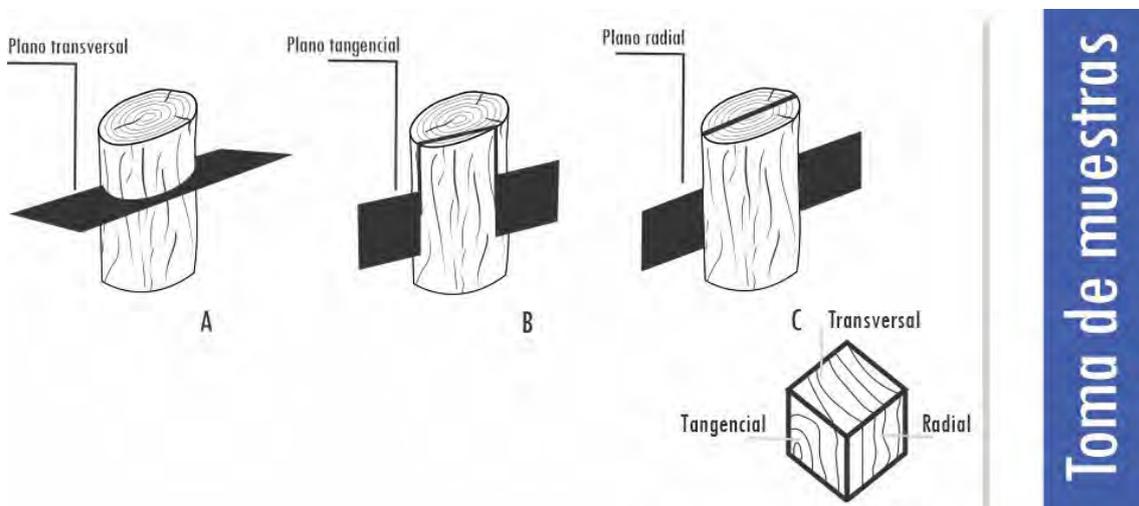


Figura 12: Esquema de los tres planos ortogonales de la madera un trozo de madera A (Corte transversal), B (Corte tangencial), C (Corte Radial).

Toma de muestras para determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera.

En la práctica la determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera se lleva a cabo con probetas o muestras de ensayos, de diferentes dimensiones, de acuerdo a la experiencia realizada y Norma Técnica utilizada. Hoheisel (1968) y las Normas COPANT N° 458 indican el número de individuos (árboles) que se deben seleccionar de la población de la cual se quiere obtener información a través de los ensayos. Se trata de un número de individuos que reúnan determinadas características dadas por la Norma, y con un rango de exactitud del valor promedio que estará de acuerdo con el objetivo de estudio propuesto.

Cuando la finalidad del estudio es obtener como resultado el valor medio de una propiedad, será suficiente trabajar con una seguridad estadística de 95 % y un intervalo de confianza de 15 %, requiriendo en este caso, entre 5 a 6 árboles, tomando de cada uno de

ellos sólo una troza (trozo de fuste de 1,40 m) al azar (Hoheisel, 1968). En la figura 13 se indican las etapas ejecutadas desde el volteo del árbol hasta la obtención de las probetas de ensayo.

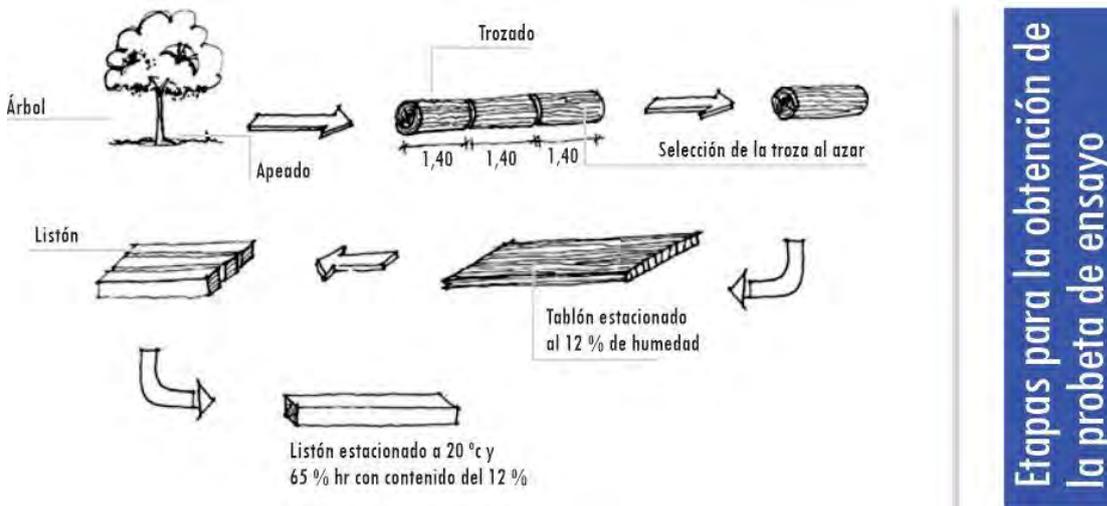


Figura 13. Etapas ejecutadas desde el volteo del árbol hasta la obtención de las probetas de ensayo. Fuente: Hoheisel (1968) y COPANT (1972).

Si el objetivo del estudio es determinar las diferencias estadísticas entre los individuos de una misma especie, las exigencias se incrementan y se deberá trabajar con una seguridad estadística de 95 % y un intervalo de confianza del valor promedio de 10 % (Hoheisel, 1968). En este caso, se deberá recolectar entre 10 a 12 árboles, siguiendo el esquema de la figura anterior, marcando en cada árbol el diámetro altura de pecho (DAP) a 1,30 m, y eligiendo la primera troza a partir del DAP, para la elaboración de las probetas de ensayo.

PESO ESPECÍFICO

PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

Las propiedades físicas de la madera son aquellas que pueden determinarse sin alterar la integridad de la muestra sometida a ensayo, sin cambiar su composición química, es decir, que pueden definirse mediante la inspección, la pesada, la medida y el secado.

La importancia de la determinación de estas propiedades radica en la posibilidad de elegir maderas de una clase u otra para su utilización posterior en determinado artículo o aplicación, teniendo noción del comportamiento que presentarán cuando sean colocadas en uso y durante su vida útil.

Las propiedades físicas que abordaremos en esta serie didáctica serán las siguientes:

- Peso específico de la madera.
- Humedad de la madera.
- Sorción en maderas.
- Contracción e hinchamiento de la madera.
- Propiedades térmicas de la madera.
- Propiedades eléctricas de la madera.
- Propiedades acústicas de la madera.

PESO ESPECÍFICO

El peso específico de la madera es una de las propiedades físicas más importantes, pues de ella dependen la mayoría de sus características físicas y mecánicas, sirviendo en la práctica como referencia para una clasificación de las maderas argentinas.

f_x

$$\text{Peso Específico} = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

El peso específico es una medida de la calidad de una madera, pues de él dependen su resistencia mecánica, su trabajabilidad, la extensión de los cambios dimensionales, calidad de acabados y su poder calorífico.



El peso total de una pieza de madera está proporcionado por la masa celular, el agua que impregna la pared celular y llena los lúmenes de dimensiones microscópicas, y también los extractivos, que se encuentran en escasa proporción, siendo su influencia respecto al peso, limitada. En cambio, el agua es un elemento muy importante en el peso de la madera, ya que en una muestra, el peso del agua puede llegar a superar altamente al peso de la pared celular. En la madera se distinguen dos tipos de pesos específicos: real y aparente.

Peso específico real

El peso específico real " γ " se define como el peso específico de la pared celular o sustancia madera, y se expresa como la relación entre el peso de una muestra en estado anhidro y el volumen de la misma sin tomar en cuenta en su determinación los espacios vacíos.

f_x

$$\gamma = \frac{P_0}{V} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

Donde:

γ = Peso específico real.

P_0 = Peso de la muestra en estado anhidro.

V = Volumen de la pared celular.

El peso específico real de una madera es un valor relativamente constante para todas las especies, ya que solo considera la densidad de los componentes químicos que forman la pared celular (celulosa, hemicelulosa y lignina), y los porcentajes de éstos son constantes. En general, se acepta que la densidad de la pared celular varía entre 1,50 g/cm³ a 1,53 g/cm³.

Peso específico aparente

El peso específico aparente de la madera es la relación del peso por su unidad de volumen, sin descontar en este último los espacios huecos interiores que existen en la madera, y medidos en las mismas condiciones de humedad. El peso específico aparente generalmente se indica en gramos por centímetro cúbico.

f_x

$$r = \frac{P}{V} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

Donde:

r : Peso específico medido en $\frac{g}{cm^3}$.

P : Peso medido g .

V : Volumen medido en cm^3 .

Otro término que menciona la bibliografía para indicar este valor es densidad, cuya definición corresponde a la relación de la masa de un cuerpo por unidad de volumen ($\rho = \frac{m}{v}$). Puede tomarse como más exacta por ser independiente del lugar o la posición en el espacio.

El peso específico de la madera puede tomarse como una medida de calidad, ya que de él dependen su resistencia mecánica, su trabajabilidad, la extensión de los cambios dimensionales y la calidad de los acabados.

El peso específico está relacionado con la humedad de la madera de una manera más o menos compleja, de modo que al comparar pesos específicos debe indicarse la humedad a la que ese valor fue determinado. La correspondiente variación de la madera no es la única que presenta, también influye en sus cambios dimensionales cuando la humedad varía por debajo del punto de saturación de las fibras (de 0 % a 30 %).

Esto nos indica la importancia de establecer siempre las condiciones en las que se obtuvo el peso específico. Aunque el peso específico puede medirse con varios contenidos de humedad, los resultados obtenidos serán muy variables, por lo que es necesario estandarizar para propósitos de comparación. Las condiciones comunes serían:

$$r_0 = \frac{P_0}{V_0} \quad r_{12} = \frac{P_{12}}{V_{12}} \quad r_v = \frac{P_v}{V_v}$$

Donde los subíndices correspondientes aclaran el contenido de humedad en que fueron determinados los pesos específicos, "0" para la condición anhidra, "12" para el contenido de humedad al doce por ciento y "v" para un contenido de humedad igual o superior al punto de saturación de las fibras, también llamado estado verde.

El r_0 es más utilizado para estudios técnicos ya que elimina la influencia del agua en la madera; el r_v (conocido como peso volumétrico), además de que en ciertas condiciones no presenta cambios, permite ser utilizado para ciertos aspectos como el manejo y transporte de madera. El r_{12} no tiene la condición de los anteriores, se utiliza para determinar el peso que tendrá la madera en condiciones normales de uso, pues generalmente se estabiliza alrededor de ese valor.

En la tabla 5 se muestran ejemplos de maderas clasificadas según su peso específico aparente (r_{12}).

| Tabla 5. Clasificación de las maderas según peso específico aparente al 12%. | | | | |
|--|--|---|---|--|
| Muy livianas | Livianas | Semipesadas | Pesadas | Muy pesadas |
| Hasta 0,350 g/cm ³ | Entre 0,350 g/cm ³ y 0,550 g/cm ³ | Entre 0,550 g/cm ³ y 0,750 g/cm ³ | Entre 0,750 g/cm ³ y 1,000 g/cm ³ | Más de 1,000 g/cm ³ |
| Kiri, álamo, sauce, madera balsa, seibo. | Laurel amarillo, timbó, álamo criollo, pino radiata, paraíso, cedro salteño. | Eucaliptus, laurel negro, loro negro, lenga, cedro misionero, azota caballo, tipa blanca, loro blanco. | Eucalyptus camandulensis, algarrobo negro, algarrobo blanco, anchico colorado, espina de corona, guatambú blanco, guayaibí blanco, incienso, quebracho blanco. | Lapacho amarillo, lapacho negro, urunday, urundel, Itin, guayacán, quebracho colorado. |

Existen otras maneras de informar el peso específico, las cuales son útiles en varios casos prácticos (celulosa e impregnación), éstas consisten en relacionar siempre el peso anhidro (P_0) entre: el volumen seco (V_0), o el volumen a un contenido de humedad de 12% o sobre el estado verde (V_v), esto es:

$$PSV_0 = \frac{P_0}{V_0} \qquad PSV_{12} = \frac{P_0}{V_{12}} \qquad PSV_v = \frac{P_0}{V_v}$$

A estas relaciones se las denomina “Peso Seco Volumétrico”.

De la forma en las que se presentan las relaciones en PSV , es importante hacer resaltar las condiciones que posee:

- Indica la proporción real de madera seca que existe en la unidad de volumen para cualquier contenido de humedad;
- cuando se determina el PSV_0 , su valor es igual al del r_0 (único caso), por ser evaluados en las mismas condiciones; y
- el PSV_v es normalmente el más usado, por ser práctico y fácil de obtener y repetir.

Relación del peso específico y humedad

Por debajo del punto de saturación de las fibras (PSF) el peso específico aparente (r) está estrechamente relacionado con el contenido de humedad de la madera. El aumento en el porcentaje de humedad provoca un incremento de volumen y en consecuencia un hinchamiento porcentual en la madera. Por lo tanto, el peso específico de una madera a un determinado porcentaje de humedad (r_μ) dependerá del peso específico aparente anhidro (r_0), del contenido de humedad (μ) y del hinchamiento volumétrico (α_v).

f_x

$$r_\mu = \frac{P_\mu}{V_\mu} = \frac{P_0(1 + \mu)}{V_0(1 + \alpha_v)} = r_0 \frac{(1 + \mu)}{(1 + \alpha_v)}$$

Donde:

r_μ = Peso específico aparente húmedo $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$.

P_μ = Peso de la muestra húmeda $[g]$.

μ = Humedad de la madera en base seca $[\%]$.

V_μ = Volumen de la muestra húmeda $[cm^3]$.

V_0 = Volumen de la muestra anhidra $[cm^3]$.

P_0 = Peso de la muestra anhidra $[g]$.

r_0 = Peso específico aparente anhidro $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$.

α_v = Coeficiente de hinchamiento volumétrico.

Si: $\alpha_v = 0,84 \cdot r_0 \cdot \mu$

Entonces: $r_\mu = r_0 \frac{1+\mu}{1+0,84 \cdot r_0 \cdot \mu}$

Kollmann (1959), propone un gráfico para efectuar la conversión directa a partir del valor del peso específico aparente anhidro (r_0) y la humedad de la madera (μ).

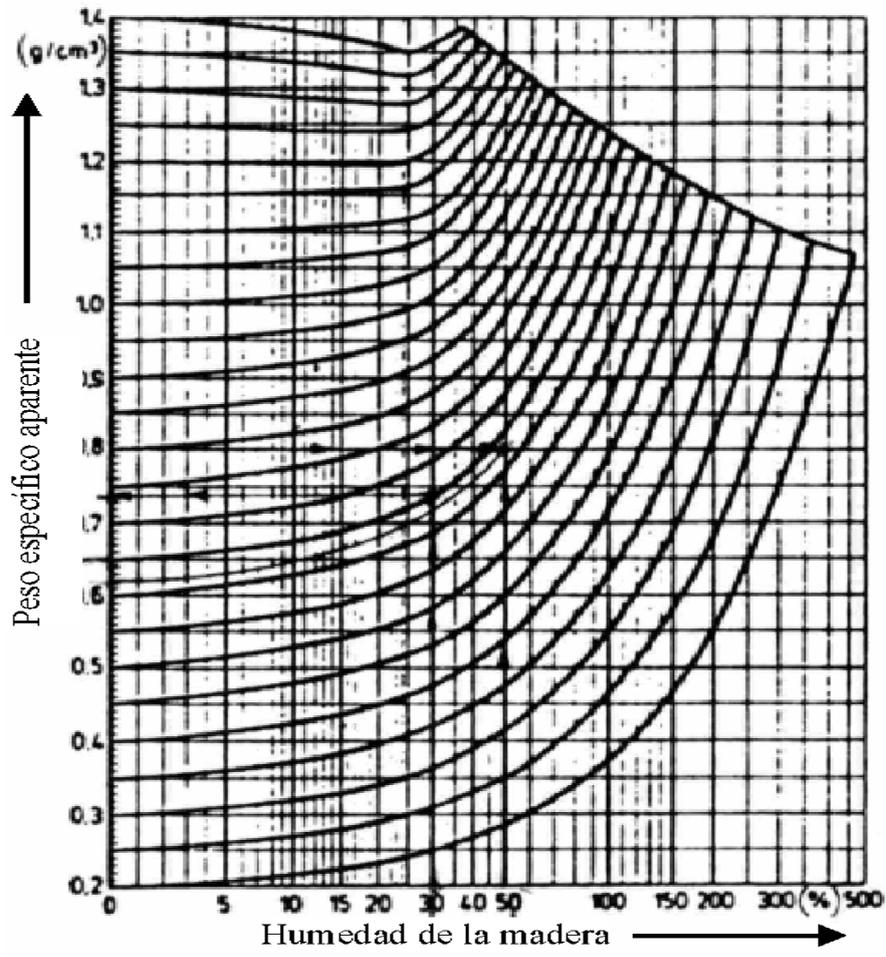


Figura 14. Relación entre el peso específico aparente y la humedad de la madera. Fuente: Kollmann (1959) y Norma DIN 52182 (1976).

Factores que influyen en la variación del peso específico de la madera

Existen factores internos y externos que reflejan la variación del peso específico de la madera, en niveles interespecíficos, intraespecíficos, e incluso dentro de un mismo individuo (Kollmann, 1959).

Factores internos

- Especie.
- Humedad.
- Extractivos.
- Leño temprano y tardío.
- Espesor del anillo de crecimiento.
- Variaciones del peso específico aparente en el interior del tronco.

Factores externos

- Aspectos de suelo en el lugar de crecimiento.
- Aspectos de clima en el lugar de crecimiento.
- Tratamientos silviculturales.

Tabla 6. Peso específico anhidro (r_0) y al 12% de humedad (r_{12}) en gr/cm³; como asimismo porosidad en % de distintas maderas de la Región del Parque Chaqueño Argentino

| Especie | Peso Esp. Aparente al 0% Aparente al 12% | | Porosidad (%) |
|------------------------|---|------------------------------------|------------------|
| | r_0 (gr/cm ³) | r_{12} (gr/cm ³) | |
| | \bar{x} (gr/cm ³) | \bar{x} (gr/cm ³) | |
| Algarrobo negro | 0,76 | 0,82 | 49,00 |
| Brea | 0,56 | 0,60 | 62,00 |
| Curupay | 1,02 | 1,07 | 31,00 |
| Lapacho negro | 0,93 | 0,87 | 37,00 |
| Mistol | 0,97 | 1,02 | 34,00 |
| Mora amarilla | 0,93 | 1,01 | 37,00 |
| Palo blanco | 0,73 | 0,77 | 51,00 |
| Palo amarillo | 0,86 | 0,91 | 42,00 |
| Quebracho blanco | 0,87 | 0,89 | 41,00 |
| Quebr.color.santiag. | 0,96 | 1,03 | 35,00 |
| Quina | 0,92 | 0,96 | 38,00 |
| Álamo 1-64 | 0,36 | 0,38 | 76,00 |
| Araucaria bidwilli | 0,47 | 0,50 | 68,00 |
| Casuarina | 0,61 | 0,65 | 59,00 |
| Eucalip camaldulensis | 0,84 | 0,87 | 43,00 |
| Eucalipto tereticornis | 0,85 | 0,87 | 43,00 |
| Kiri | 0,27 | 0,30 | 82,00 |
| Paraíso gigante | 0,69 | 0,72 | 54,00 |
| Pino halepensis | 0,58 | 0,61 | 61,00 |
| Coronel (1989) | | | |

Determinación del peso específico

La determinación del peso específico aparente de las maderas está indicada por la Norma IRAM 9544. De acuerdo a ello es necesario efectuar dos mediciones:

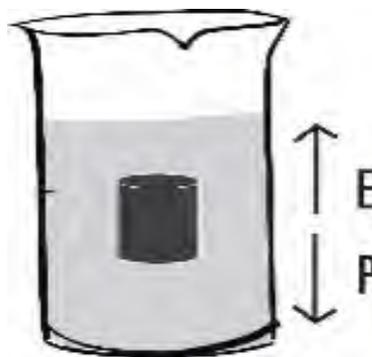
- Determinación del peso.
- Determinación del volumen.

El peso será determinado por intermedio de una balanza sensible al 0,01 gr. El volumen puede medirse por varios métodos, entre ellos:

- Medición directa, o sea por el método estereométrico.
- Método en inmersión de fluidos.

La medición directa o estereometría consiste en medir directamente la probeta. Con un tornillo micrométrico procedemos a medir las tres dimensiones (largo, ancho y espesor), y calculamos el volumen multiplicando las tres dimensiones entre sí. En este caso, la preparación de las probetas exige la perfección de sus secciones, que es indispensable y lleva mucho tiempo. Además, es necesario seleccionar piezas sin defectos, como rajaduras y/o deformaciones que se originan inevitablemente durante el secado, y son factores que introducen errores considerables.

En el método por inmersión de fluidos el volumen puede ser determinado por el desplazamiento de fluidos, entre ellos, el agua, a pesar de que la precisión puede caer a causa de la adsorción de humedad por parte del tejido leñoso. Este inconveniente puede ser superado dejando la madera o probeta en agua por muy poco tiempo o impermeabilizando sus superficies con parafina. En este método se utiliza una balanza y un recipiente con agua, se introduce la probeta en el recipiente con agua y el volumen desplazado por la inmersión sería igual a su peso, ya que la densidad del agua es $\rho = 1 \frac{g}{cm^3}$, y puede leerse directamente de la balanza.



$$P_{probeta} = E_{fluido} = V_{desplazado} \cdot \rho_{fluido}$$

Donde

$P_{probeta}$: Peso de la probeta [g]

$V_{desplazado}$: Volumen del fluido [cm³] desplazado.

E_{fluido} : Empuje del fluido [g]

ρ_{fluido} : Densidad del fluido [$\frac{g}{cm^3}$]

Si el $P_{probeta} = E_{fluido}$, y el $E_{fluido} = V_{desplazado} \cdot \rho_{fluido}$
entonces $P_{probeta} = V_{desplazado} \cdot \rho_{fluido}$ cuando $\rho = 1 \frac{g}{cm^3}$.

Este método tiene la ventaja de poder medir el volumen de cuerpos de probetas irregulares.

Aparatos e instrumental

- Balanza de precisión de 0,01 gr.
- Tornillos micrométricos de 0-25 mm con precisión de 0,01 mm.
- Volumenómetro por inmersión en agua o en mercurio.
- Estufa eléctrica, que opera a una temperatura de 100+3 °C.
- Desecador con cloruro de calcio.



Balanza analítica



Tornillo micrométrico



Volumenómetro



Estufa

Figura 15. Aparatos e instrumental para determinación de peso específico. Imágenes: Maximiliano Umlandt

Determinación del Volumen.

- **Por inmersión**

Se coloca en un recipiente de vidrio de 100 a 150 cm³ de agua y se pesa al 0,01 gr. de precisión. Se sumerge la probeta en el recipiente de vidrio y la aguja se clava en la probeta para poder empujarla. La aguja debe ser lo más fina posible y la inmersión debe efectuarse de manera tal que la probeta quede a pocos milímetros bajo la superficie, para que el volumen de la aguja que se sumerge junto con la probeta no influya en la determinación.

El peso específico aparente de la madera, resulta entonces

$$V = \frac{\text{Peso del recipiente con agua} + \text{probeta} - \text{Peso del recipiente con agua}}{\rho_{H_2O}}$$

Los datos pueden registrarse en una planilla como la que se muestra en la Tabla N°7

Tabla 7. Planilla para registro de la determinación del peso específico aparente por inmersión.

| Muestra N° | Inicial | | | | | Anhidro | | | | | %u |
|------------|--------------|----------------------------------|---|---|----|--------------|----------------------------------|---|---|----|----|
| | Peso probeta | P _{vaso+H₂O} | P _{vaso+H₂O} + P _{probeta} | V | Pe | Peso probeta | P _{vaso+H₂O} | P _{vaso+H₂O} + P _{probeta} | V | Pe | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Por estereometría

En cada probeta se debe medir el ancho, espesor y longitud con tornillo micrométrico y luego multiplicar esos valores para obtener el volumen de cada muestra. A medida que se realiza una medición se la debe registrar inmediatamente en una planilla como la que se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Planilla para registro del peso específico aparente por medición del volumen.

| Especie: | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------|-------------|----------|----------|---------|----------------|------|-------------|----------|----------|---------|---------|----|
| Probeta N° | Estado húmedo | | | | | Estado anhidro | | | | | Humedad | | |
| | Peso | Dimensiones | | | Volumen | Pe | Peso | Dimensiones | | | | Volumen | Pe |
| | | <i>l</i> | <i>a</i> | <i>e</i> | | | | <i>l</i> | <i>a</i> | <i>e</i> | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

Ejercicios de aplicación: peso específico

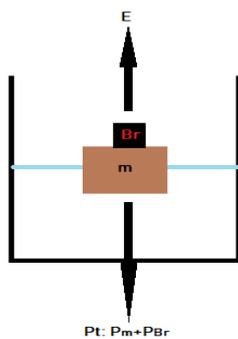


Ejercicio 1: Determine qué porcentaje de un cubo de madera se

hundirá en agua luego de colocar sobre él una carga adicional de bronce.

Datos: $P_{bronce} = 2,2 \text{ g}$; $P_{mad} = 9,1 \text{ g}$; $Pe_{mad} = 0,7 \text{ g/cm}^3$.

Resolución: Para resolver el ejercicio consideramos que la sumatoria de fuerzas que actúan sobre el eje Y es igual a cero. De esta manera nos queda que el empuje es igual al peso, tanto de la madera como del bronce. Por definición el empuje es igual a la fracción que se hunde por el volumen de la madera por la densidad del líquido.



$$P = E; \quad P = E = X \cdot V_{mad} \cdot \delta_{liq}$$

Solo tendríamos que despejar nuestra fracción que se hunde X , pero desconocemos el volumen de la madera. Para obtenerlo usamos la definición de peso específico y de allí despejamos el volumen.

$$Pe = \frac{P}{V} \Rightarrow V = \frac{P}{Pe} = \frac{9,1 \text{ g}}{\frac{0,7 \text{ g}}{\text{cm}^3}} = 13 \text{ cm}^3$$

$$P = P_{mad} + P_{bronce}; \quad P_{mad} + P_{bronce} = X \cdot V_{mad} \cdot \delta_{liq} \Rightarrow X = \frac{P_{mad} + P_{bronce}}{V_{mad} \cdot \delta_{liq}}$$

$$X = \frac{9,1 \text{ g} + 2,2 \text{ g}}{13 \text{ cm}^3 \cdot \frac{1 \text{ g}}{\text{cm}^3}} = 0,87 \text{ (fracción de la probeta que queda sumergida)}$$

X = Fracción de la probeta que queda sumergida.

V_{mad} = Volumen de la probeta de madera [cm^3].

δ_{liq} = Densidad del líquido donde se sumerge la probeta [$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$].

P = Peso de la probeta + peso del bronce [g].



Ejercicio 2: Calcular la fracción que se hunde de una muestra de

madera de $Pe_{mad} = 600 \text{ kg/m}^3$ que se coloca en agua.

Resolución: Para resolver este ejercicio consideramos la ley de Arquímedes “Un cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del volumen del fluido desalojado por el cuerpo”.



Despejando nuestra incógnita que es la fracción que se hunde X y teniendo en cuenta que el peso es igual al peso específico por el volumen, se cancelan los volúmenes y nos queda que la fracción que se hunde es igual al peso específico sobre la densidad del líquido que es la del agua.

$$\text{Peso } (P) = \text{Empuje } (E) \ ; \ P = E = X \cdot V_{mad} \cdot \delta_{liq}$$

$$X = \frac{P}{V_{mad} \cdot \delta_{liq}} \ ; \ r = \frac{P}{Vol} \ ; \ X = \frac{r}{\delta_{liq}}$$

$$X = \frac{0,6 \frac{g}{cm^3}}{1 \frac{g}{cm^3}} = 0,6 \text{ es decir, la probeta queda sumergida un } 60\%$$

X = Fracción de la probeta que queda sumergida.

V_{mad} = Volumen de la probeta de madera [cm^3].

δ_{liq} = densidad del líquido donde se sumerge la probeta [$\frac{g}{cm^3}$].



Ejercicio 3: Calcular el peso específico de una muestra de madera cuyo volumen es $V_{mad} = 50 \text{ cm}^3$ y posee un peso de $P_{mad} = 0,06 \text{ kg}$.

Resolución: Para resolver este ejercicio usamos la definición de peso específico. Al peso específico lo podemos expresar en $\frac{kg}{m^3}$ o en $\frac{g}{cm^3}$, en este caso elegimos esta última relación, por lo que transformamos el peso expresado en kilogramos a gramos.



$$r = \frac{P}{Vol} = \frac{60 \text{ g}}{50 \text{ cm}^3} = 1,2 \frac{g}{cm^3}$$



Ejercicio 4: Un bloque cúbico de madera de arista de 10 cm es tirado hacia arriba por una cuerda con una fuerza (tensión) de $T = 14\text{ N}$ y una aceleración $a = 1,9 \frac{m}{seg^2}$ ¿De qué madera es el cubo?

Resolución: Consideramos que la sumatoria de las fuerzas que actúan sobre el eje Y es igual a la masa por la aceleración ($m \cdot a$).



$$a = 1,9\text{ m/seg}^2$$

$$T = 14\text{ N}$$

$$P = m \cdot g$$

$$\Sigma F_y = m \cdot a$$

$$T - P = m \cdot a$$

$$T - m \cdot a = P \Rightarrow T - m \cdot a = m \cdot g \Rightarrow T = m (g + a)$$

$$m = \frac{T}{(g + a)} = \frac{14\text{ N}}{(9,8\text{ m/seg}^2 + 1,9\text{ m/seg}^2)} = 1,19\text{ kg}$$

$Pe = \frac{m}{V} = \frac{1,19\text{ kg}}{(0,1\text{ m})^3} = 1116 \frac{kg}{m^3} \Rightarrow$ por la magnitud del Pe de la madera se la puede clasificar como madera muy pesada.



Ejercicio 5: Un naufrago se mantiene apenas a flote sobre un tronco. La masa del naufrago es de 90 kg . El tronco tiene forma cilíndrica con un radio de 30 cm y longitud de $1,7\text{ m}$.

- ¿Qué densidad tiene la madera?
- Si el naufrago se arroja al mar, ¿qué porcentaje del tronco estará por fuera del agua?

Resolución: En este ejercicio tomamos en cuenta el empuje del líquido y el peso tanto del hombre como del tronco. El empuje es igual a la densidad del líquido ρ_{liq} (agua) por el volumen del líquido V_{liq} y por la fracción que se hunde X , que en este caso es 1 debido a que el tronco está totalmente



sumergido, como nos da a entender el enunciado. De la fórmula $Pe = \frac{P}{V}$ despejamos el peso y nos queda que $P = Pe \cdot V$, considerando que el peso específico también es conocido como densidad (ρ_{mad}), despejamos la densidad en la ecuación y usando la fórmula del volumen de un cilindro llegamos finalmente al resultado.

a) Determinación de la densidad de la madera.

$$E - P_{mad} - P_h = 0 \Rightarrow$$

$$\rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} \cdot g - \rho_{mad} \cdot V_{mad} \cdot g - m_h \cdot g = 0 \Rightarrow$$

$$\rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} - \rho_{mad} \cdot V_{mad} - m_h = 0$$

$$\rho_{mad} = \frac{\rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} - m_h}{V_{mad}}$$

El volumen del cilindro es $V = \pi \cdot r^2 \cdot L$

$$\rho_{mad} = \frac{\rho_{H_2O} \cdot (\pi \cdot r^2 \cdot L) - m_h}{\pi \cdot r^2 \cdot L} = \frac{1030 \frac{kg}{m^3} \cdot \pi \cdot (0,3 m)^2 \cdot 1,7 m - 90 kg}{\pi \cdot (0,3 m)^2 \cdot 1,7 m}$$

$$\rho_{mad} = 842,7 kg/m^3$$

b) Para obtener el porcentaje del tronco que quedaría fuera del agua si el naufrago se arrojará al mar, tendremos en cuenta que ya no estaría el peso del hombre por lo que solamente igualamos el empuje del líquido con el peso de la madera. Como la densidad ya la obtuvimos en el ítem anterior, la relación de la densidad de la madera con la del agua nos dará la fracción sumergida. Finalmente restamos la unidad por el valor de la fracción sumergida, multiplicamos por cien y así obtendremos el porcentaje del tronco que quedará por fuera.

$$E - P_{mad} = 0 \Rightarrow E = P_{mad} \Rightarrow \rho_{H_2O} \cdot V_{sum} \cdot g = \rho_{mad} \cdot V_{mad} \cdot g$$

$$\Rightarrow \rho_{H_2O} \cdot V_{sum} = \rho_{mad} \cdot V_{mad}$$

$$\frac{V_{sum}}{V_{mad}} = \frac{\rho_{mad}}{\rho_{H_2O}} \Rightarrow \frac{V_{sum}}{V_{mad}} = \frac{842,7 kg/m^3}{1030 kg/m^3} = 0,77$$

$$\Rightarrow V_{no sum} = 1 - 0,77 = 0,223 \Rightarrow 22,3\% \text{ fuera del agua}$$



Ejercicio 6:

Un péndulo balístico de madera de densidad $\rho_{pend\ mad} = 510\text{ kg/m}^3$ que se utiliza para medir la velocidad de un proyectil, está suspendido y se dispara contra él una bala de masa $m_b = 9.5\text{ g}$ que queda incrustada. Luego del impacto, el conjunto bala-péndulo se eleva $6,3\text{ cm}$. Si la bala se disparó con una velocidad de 630 m/seg , determinar:

- Masa del péndulo
- Volumen del péndulo

Resolución: a) Se realiza el cálculo de la masa a partir del principio de conservación de la masa.



Datos: $\rho_{pend\ mad} = 510\text{ kg/m}^3$; $m_b = 9.5\text{ g}$; $h = 6,3\text{ cm}$; $v_0 = 630\text{ m/seg}$

$$P_0 = P_f$$

$$P_0 = m_b \cdot v_b + m_p \cdot 0 \quad \text{y} \quad P_f = (m_b + m_p) \cdot v_p$$

$$\Rightarrow m_b \cdot v_b = (m_b + m_p) \cdot v_p$$

Después del choque, por conservación de la energía mecánica

$$E_i = E_f \Rightarrow E_i = \frac{1}{2}(m_b + m_p) \cdot v_p^2 \quad \text{y} \quad E_f = (m_b + m_p) \cdot g \cdot h$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2}(m_b + m_p) \cdot v_p^2 = (m_b + m_p) \cdot g \cdot h \Rightarrow \frac{1}{2}(m_b + m_p) \cdot v_p^2 = (m_b + m_p) \cdot g \cdot h$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} \cdot v_p^2 = g \cdot h \Rightarrow v_p = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,8\text{ m/seg}^2 \cdot 0,063\text{ m}} = 1,11\text{ m/seg}$$

Con la velocidad podemos calcular la masa del péndulo

$$\Rightarrow m_b \cdot v_b = (m_b + m_p) \cdot v_p \quad \therefore m_p = \frac{m_b(v_b - v_p)}{v_p} = \frac{0,0095\text{ kg} \left(\frac{630\text{ m}}{\text{seg}} - \frac{1,11\text{ m}}{\text{seg}} \right)}{\frac{1,11\text{ m}}{\text{seg}}} = 5,38\text{ kg}$$

b) Determinación del volumen

$$\rho_{pend\ mad} = \frac{m}{V} \Rightarrow V = \frac{m}{\rho_{pend\ mad}} = \frac{5,38\text{ kg}}{510\text{ kg/m}^3} = 0,01\text{ m}^3$$



Ejercicio 7: Se ata un bloque de 5 kg de madera a un dinamómetro y se sumerge en un recipiente con agua de mar. La escala del dinamómetro marca 6,16 N. ¿Cuál es la densidad de la madera?
 $\rho_{fluido} = 1030 \text{ kg/m}^3$.

Resolución:

$$T + E - P = 0$$

Como el peso es igual a $m \cdot g$ (masa por la aceleración de la gravedad)

$$E = P - T \Rightarrow E = m \cdot g - T = 5 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/seg}^2 - 6,16 \text{ N} = 42,84 \text{ N}$$

Luego, con la fórmula del empuje despejamos el volumen para obtener su valor y usarlo en la fórmula de la densidad

$$E = \rho_{H_2O} \cdot V \cdot g \Rightarrow V = \frac{E}{\rho_{H_2O} \cdot g} = \frac{42,84 \text{ N}}{1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}} = 0,0042 \text{ m}^3$$

$$\rho_{mad} = \frac{m}{V} = \frac{5 \text{ kg}}{0,0042 \text{ m}^3} = 1190,47 \text{ kg/m}^3$$



Ejercicio 8: Un objeto de madera flota en el agua con el 80 % de su volumen sumergido. El mismo objeto situado en otro líquido flota con el 72 % de su volumen por debajo de la superficie.

- Determinar la densidad de la madera
- Determinar la densidad específica del líquido.

Resolución:

a) Cálculo de la densidad de la madera.

$$E - P = 0 \Rightarrow E = P \Rightarrow \rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} \cdot g = \rho_{mad} \cdot V_{mad} \cdot g$$

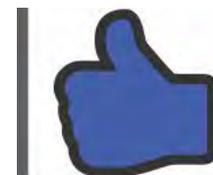
Siendo $V_{H_2O} = 0,8 V_{mad}$ queda

$$\rho_{H_2O} \cdot 0,8 V_{mad} \cdot g = \rho_{mad} \cdot V_{mad} \cdot g$$

Los volúmenes se cancelan y considerando que la densidad del agua es 1000 kg/m^3

$$\rho_{H_2O} \cdot 0,8 = \rho_{mad}$$

$$\rho_{mad} = 800 \text{ kg/m}^3$$



b) Cálculo de la densidad específica del líquido.

$$\begin{aligned} E' - P &= 0 \Rightarrow E' = P \Rightarrow \rho_{liq} \cdot V_{liq} \cdot g = \rho_{mad} \cdot V_{mad} \cdot g \\ &\Rightarrow \rho_{liq} \cdot 0,72 V_{mad} \cdot g = 0,8 \rho_{H_2O} \cdot V_{mad} \cdot g \\ &\Rightarrow \rho_{liq} \cdot 0,72 = 0,8 \rho_{H_2O} \\ &\Rightarrow \rho_{liq} = \frac{0,8 \rho_{H_2O}}{0,72} = 1144,4 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$



Ejercicio 9: Se enrolla a un tambor cilíndrico de madera el extremo de una cuerda. Del otro extremo se aplica una fuerza de $T = 50 \text{ N}$. La aceleración angular producida por la fuerza es de $12 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$.

a) Encuentre el momento de inercia del tambor.

b) Si se trata de una madera cuya densidad es 875 kg/m^3 ¿Cuál será su volumen? El radio del tambor es $R = 0,25 \text{ m}$.

Resolución:

a) Determinación del momento de inercia del tambor.

$m = \text{masa}$; $\alpha_a = \text{aceleración angular}$;

$I = \text{momento de inercia}$; $\tau = \text{Momento de la fuerza } T$



$$\tau = I \cdot \alpha_a \quad \text{y} \quad \tau = T \cdot R$$

$$I \cdot \alpha_a = T \cdot R \Rightarrow I = \frac{T \cdot R}{\alpha_a}$$

$$I = \frac{T \cdot R}{\alpha_a} = \frac{50 \text{ N} \cdot 0,25 \text{ m}}{12 \text{ rad/seg}} = 1,042 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Para un cilindro sólido de radio R y masa m

$$I = \frac{m \cdot R^2}{2} \Rightarrow m = \frac{2 \cdot I}{R^2} = \frac{2 \cdot 1,042 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{(0,25 \text{ m})^2} = 8,33 \text{ kg}$$

b) Cálculo del volumen.

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{8,33 \text{ kg}}{875 \text{ kg/m}^3} = 0,0095 \text{ m}^3$$



Ejercicio 10: Utilizando la tabla de la figura N°15 determine el

nuevo valor de peso específico para un contenido de humedad $\mu = 40\%$, de una pieza de madera cuyo peso específico es $Pe = 530 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ y

que se encuentra en equilibrio higroscópico con un ambiente cuya temperatura y humedad relativa son $T = 24^\circ\text{C}$ y $HR = 65\%$, respectivamente.

Resolución: Una pieza de madera en equilibrio con un ambiente cuya temperatura y humedad relativa son $T = 24^\circ\text{C}$ y $HR = 65\%$, tendrá una humedad $\mu = 12\%$. Esa es la humedad con la que debemos



acceder a la tabla y encontrar la curva con la que se intercepta para un valor de $Pe = 530 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Hallada la curva, acompañamos el recorrido de la misma hasta la intersección con el nuevo valor de humedad $\mu = 40\%$, para el cual, el valor de peso específico que le corresponde es $Pe = 620 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.



Ejercicio 11: Determine analíticamente los valores de peso

específico que tendrá una madera de algarrobo blanco (*Prosopis alba* Griseb) en estado seco al aire libre en Santiago del Estero y en el punto de saturación de las fibras (PSF).

Resolución: De la tabla 6 se extrae el valor del peso específico anhidro que le corresponde al algarrobo blanco, el cual es $r_0 = 730 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.



La humedad de una madera en estado seco al aire libre en Santiago del Estero se espera que ronde entre el 12% y el 14%, elegiremos $\mu = 12\%$. El punto de saturación de las fibras es un valor teórico el cual se considera igual al 30% de humedad.

La ecuación es:
$$r_\mu = r_0 \frac{1+\mu}{1+0,84 \cdot r_0 \cdot \mu}$$

Para $\mu = 12\%$ resulta
$$r_{12\%} = 0,73 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \frac{1+0,12}{1+0,84 \cdot 0,73 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 0,12} = 0,76 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Para $\mu = \text{PSF}$ resulta
$$r_{30\%} = 0,73 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \frac{1+0,30}{1+0,84 \cdot 0,73 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 0,30} = 0,80 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

HUMEDAD DE LA MADERA

HUMEDAD DE LA MADERA

Se entiende por humedad de la madera a la cantidad de agua contenida en el leño. El agua contenida en la madera se encuentra en su interior de dos formas, como agua libre en las cavidades de las células y como agua ligada a la pared celular.

Agua libre es aquella que se encuentra en el lumen de la célula, es la primera que se pierde durante el proceso de secado de la madera. Este tipo de agua se pierde o extrae fácilmente por evaporación, pues en la madera es retenida por fuerzas de atracción capilares que son muy débiles.

Agua higroscópica o de impregnación, se encuentra ligada a las paredes por interacción molecular y es más difícil de extraer. Es el agua que la madera absorbe del ambiente o desorbe hacia el ambiente, hasta alcanzar un equilibrio higroscópico que dependiendo de la región puede estar entre el 12% y 18% de humedad. En esta fase la madera sufre variaciones en sus dimensiones y resistencias mecánicas.

Agua de constitución es la que forma parte de la pared celular y que no puede ser extraída a menos que la madera sea sometida a un proceso de combustión.



De acuerdo a su contenido de humedad la madera se clasifica en:

- Madera verde: 50 a 200 % de agua respecto al peso seco.
- Madera puesta en servicio expuesta al exterior: 12 % a 17 % de agua respecto al peso seco.
- Madera puesta en servicio en contacto con ambientes interiores: 8 % a 13 % de agua respecto al peso seco.

Debido a su naturaleza higroscópica, la madera intercambia su humedad con la existente en el medio ambiente que la rodea hasta alcanzar el equilibrio. Esta situación produce cambios dimensionales importantes para su posterior uso. Por esta razón la

humedad resulta ser una propiedad física muy importante, pues influye sobre el resto de las propiedades físico mecánicas.

El gradiente de humedad es un factor que indica la distribución del contenido de humedad en todas las partes de una pieza de madera. Éste está determinado por la relación entre el contenido de humedad de la madera en el centro y en la superficie, da origen a la circulación interna del agua desde el centro a la periferia y es la causa del secado de la madera.

La humedad en la madera influye sobre las propiedades físicas y mecánicas, volumen, peso específico, dureza, resistencia mecánica, su aptitud para el maquinado, poder calorífico, resistencia al ataque de hongos, impregnación, peso y sobre todo los cambios dimensionales que sufre la madera a consecuencia de su variación volumétrica.



Mientras más elevado sea el gradiente de humedad más rápido secará la madera y si el gradiente es bajo el tiempo de secado se prolongará.

Expresiones del contenido de humedad

Contenido de humedad en base seca

El contenido de humedad en base seca es la cantidad de agua que existe en una pieza de madera, expresada como porcentaje del peso de ésta en condición totalmente anhidra y se la identifica con μ .

 f_x

$$\mu = \frac{P_h - P_0}{P_0} \times 100$$

Donde

μ : Contenido de humedad de la madera en base seca [%]

P_h : Peso de la madera húmeda [gr.]

P_0 : Peso de la madera en estado anhidro [gr.]

A modo de ejemplo, si el peso de una pieza de madera en estado húmedo es $P_h = 10\text{ g}$ y al secarla en estufa de laboratorio se obtiene un peso anhidro de $P_0 = 6\text{ g}$; el contenido de humedad referido en base seca será:

$$\mu = \frac{P_h - P_0}{P_0} \times 100 = \frac{10\text{g} - 6\text{g}}{6\text{g}} \times 100 = 66\%$$

El resultado para $\mu = 66\%$ nos indica que 166 partes de madera húmeda contienen 100 partes de madera seca y 66 partes de agua. O sea que el agua pesa un 66 % de lo que pesa realmente la madera seca.

Contenido de humedad en base húmeda

En algunos casos es necesario conocer el peso del agua contenida en una madera en función del peso húmedo de ésta, como en las técnicas de la industria de la celulosa y de combustión de la madera. Razón por la cual el contenido de humedad se expresa como base húmeda y se denota con X .

 f_x

$$X = \frac{P_h - P_0}{P_h} \times 100$$

Donde

X : Contenido de humedad de la madera en base húmeda [%]

P_h : Peso de la madera húmeda [gr.]

P_0 : Peso de la madera en estado anhidro [gr.]

Tomando los mismos valores del ejemplo anterior, ahora resultaría

$$X = \frac{P_h - P_0}{P_h} \times 100 = \frac{10\text{g} - 6\text{g}}{10\text{g}} \times 100 = 40\%$$

En este caso, para un $X = 40\%$ significa que 100 partes de madera húmeda contienen 40 partes de agua y 60 partes de madera seca.

Relación entre ambas expresiones

f_x

$$\mu = \frac{X}{1-X} \times 100 \quad \text{y} \quad X = \frac{\mu}{1+\mu} \times 100$$

Las ecuaciones anteriores relacionan las humedades de la madera en base húmeda y en base seca, permitiéndonos así obtener una a partir de la otra y viceversa.

La relación contenido total de agua/material leñoso es muy variable en una pieza de madera y, en muchos casos, como pinos, sauces, álamos y eucaliptos, pueden tener valores muy superiores al 100% respecto de su peso seco, aunque lo más común es que estos valores no superen el 100%.

Fuente: Atencia M. E. (2006)



Determinación del contenido de humedad

Los métodos más importantes y de mayor aplicación práctica son los siguientes:

- Método por pesadas o desecación en estufa.
- Métodos eléctricos o con xilohigrómetro.
- Determinación del volumen de agua por destilación.

Estos métodos están indicados en la Norma IRAM 9532, la cual establece los protocolos para la obtención de las muestras, determinación del contenido de humedad y determinación del gradiente de humedad.

Método por pesadas o desecación en estufa

Este método es muy utilizado en trabajos técnicos y de investigación y a pesar de ser largo, es uno de los más exactos y precisos, siendo su exactitud de 0,5 a 1%. En este método es muy importante que la madera no entregue sustancias volátiles.

Para determinar la humedad en la madera con este método, se obtienen piezas pequeñas de madera (probetas) de un espesor no mayor de 20 mm y de preferencia que no sea que no sean obtenidas de los extremos de la madera. La muestra se pesa inmediatamente, obteniendo así su peso húmedo " P_h "; posteriormente se introduce en estufa a una

temperatura de $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, hasta obtener un peso constante en dos o tres pesadas consecutivas, con intervalos de 24 hs, al que registramos como peso anhidro “ P_0 ”.

Aparatos e instrumental

- Balanza con apreciación al 0,01 gr.
- Estufa eléctrica que opere a una temperatura de $100^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Desecador con cloruro de calcio.



Balanza digital



Estufa eléctrica



Desecador

Figura 16. Aparatos e instrumental para determinación de la humedad por pesadas.

Imágenes: Los autores.

El contenido de humedad se calcula utilizando la fórmula $\mu = \frac{P_h - P_0}{P_0} \times 100$

Un modelo de planilla para estos ensayos podría ser como la que se propone en la Tabla 9, para el registro de todas las mediciones realizadas.

| Tabla 9. Planilla para registro de P_h , P_0 y contenido de humedad (%H) | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Probeta N° | Peso húmedo | Peso seco 1 | Peso seco 2 | Peso seco 3 | Peso seco 4 | Peso seco 5 | H (%) |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Humedad Promedio | | | | | | | |

Gradiente de humedad

El gradiente de secado es la relación entre la humedad contenida en la madera y la humedad de equilibrio en ese ambiente. Es el valor que establece la variación en el contenido de humedad en zonas sucesivas de una pieza de madera.

Para la determinación del gradiente de humedad se utilizan probetas, las que, para el caso de material aserrado, se obtienen de acuerdo a la siguiente figura:

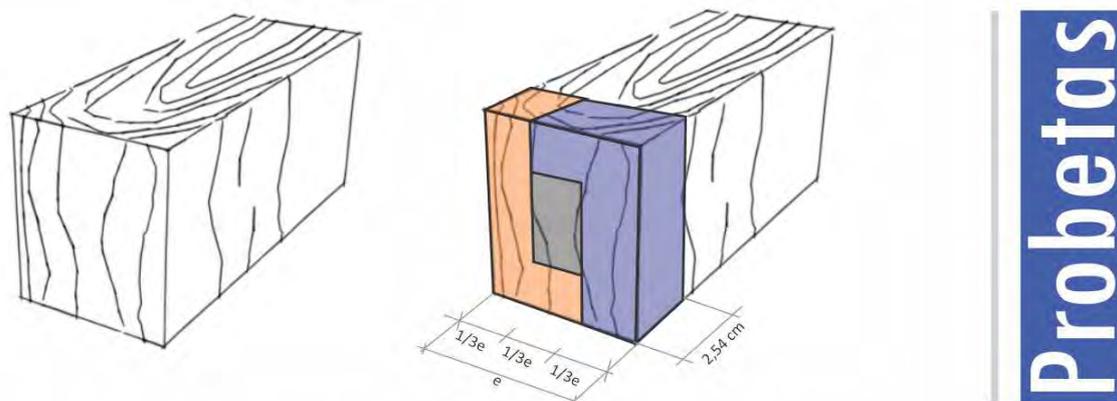


Figura 17. Obtención de probetas para determinación gradiente de humedad. Imágenes: Los autores

El número de probetas a extraer depende de las dimensiones transversales de la pieza de madera. Las mediciones realizadas pueden registrarse en una planilla como la que se propone en la Tabla 10.

| Tabla 10. Planilla para registro de los P_h , P_0 y contenido de humedad (%H) | | | | | | | | | |
|---|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| Muestra N° | Exterior | | | Interior | | | Promedio | | |
| | P_h | P_0 | H (%) | P_h | P_0 | H (%) | P_h | P_0 | H (%) |
| A | 1 | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | |
| B | 1 | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | |
| C | 1 | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | |
| D | 1 | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | |

Métodos eléctricos o con xilohigrómetro

Este método mide el contenido de humedad en la madera utilizando aparatos diseñados en base al conocimiento de que las propiedades del agua y de la materia seca de la madera ofrecen grandes diferencias, tanto en lo que se refiere a la resistencia óhmica como la constante dieléctrica.

El contenido de humedad se determina en base al grado de resistencia que presenta la madera al hacer pasar a través de ella una corriente eléctrica, la cual estará en proporción al grado de humedad que posee la madera. Las medidas eléctricas de humedad permiten calcular el contenido de humedad sin cortar o mutilar la pieza de madera, son aparatos fáciles de manejar y se obtienen lecturas rápidas. Existen dos tipos de xilohigrómetros:

- De resistencia.
- De capacitancia.

El xilohigrómetro de resistencia es el más usado, generalmente se fabrica con electrodos tipo agujas. Para la determinación de la humedad se introducen en la pieza de madera agujas o electrodos a una profundidad de una quinta o una cuarta parte de su espesor (Figura 18), la lectura que resulta es el promedio del contenido de humedad de la pieza.



Figura 18. Medición del contenido de humedad con xilohigrómetro de resistencia. Imágenes: Los autores

Este método se emplea en maderas con o sin sustancias volátiles. Presentan como inconveniente el hecho de que las lecturas son confiables únicamente en el rango higroscópico, o sea, para contenidos de humedad en la madera entre el 0% y el 28-30% (más específicamente entre el 7% al 25 %), debido a que la resistencia eléctrica en relación al contenido de humedad es proporcional solo en este rango, en lecturas de mayor contenido de humedad se incrementa el error en $\pm 10\%$.

Pan et *al.* (2009), citando a Stamm (1930), explican que el funcionamiento de estos aparatos se funda en que entre el 0 y 30 % de humedad de la madera, existe una relación

lineal entre ésta y el logaritmo de la resistividad eléctrica como se muestra en la Figura 19, por lo cual, éste es el intervalo útil de medida en la mayoría de los aparatos eléctricos. Nusser (1938), citado por Pan et al. (2009), completa los coeficientes obtenidos en los trabajos de Stamm y enuncia la siguiente relación:

f_x

$$\log r = 13,25 - 0,32x(\mu)$$

$$r = 1,78x10^{13} e^{-0,736\mu}$$

Esta relación es válida sin grandes errores en un intervalo de humedad entre 8 – 18 %.

Donde:

r : Resistencia específica o resistividad.

μ : Humedad de la madera.

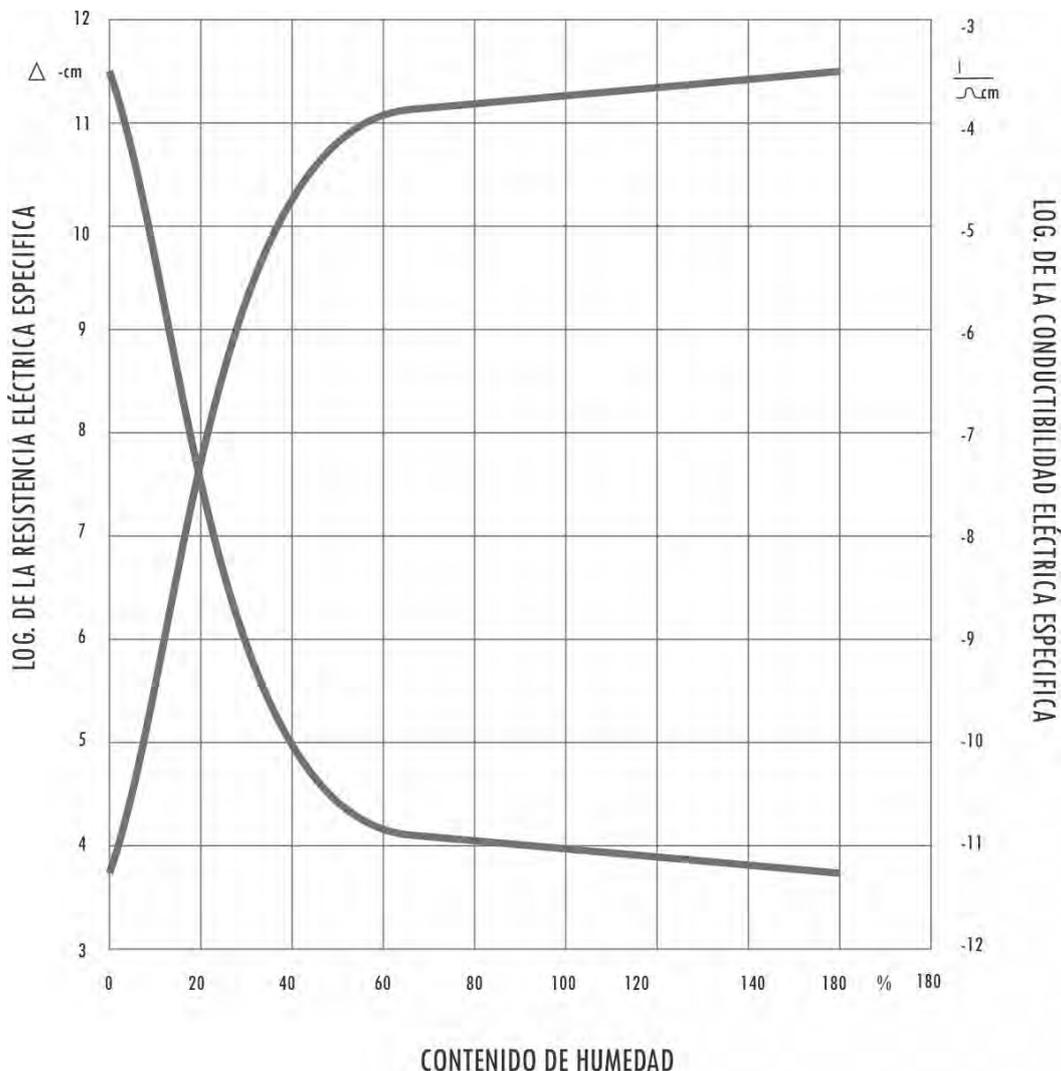


Figura 19. Resistencia y conductividad eléctricas específicas de la especie *Sequoia sempervirens*. Fuente: Stamm (1930).

- Aparatos e instrumental
 - Xilohigrómetro (Figura 20). Constituido por un círculo de resistencia eléctrica variable tipo Siemens y escalas de humedad entre 3-25% y mayores a 25%.
 - Tabla de corrección del aparato.
 - Porta electrodos, clavos o agujas.
 -



Figura 20. Xilohigrómetro de resistencia. Imágenes: Los autores

Las mediciones de contenido de humedad realizadas pueden registrarse en una planilla como la que se propone en la Tabla 11.

| Tabla 11. Planilla para registro de los contenidos de humedad (CH) | | | | |
|--|----------------|---------------|----------------|-----------------|
| Tabla N° | Extremo CH (%) | Centro CH (%) | Extremo CH (%) | Promedio CH (%) |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Método de extracción con solventes

Este método es aplicable en aquellas maderas que contienen elementos volátiles tales como resinas, terpenos y aceites esenciales, que dan valores erróneos de contenido de humedad al ser secados en estufa (entre un 5 - 10 % del peso seco), pues una parte de estos materiales se evapora con el agua. También ofrece una exacta determinación de humedad para maderas muy resinosas o con muchas sustancias de impregnación.

El procedimiento para la determinación del contenido de humedad en las maderas consiste en colocar aproximadamente 10 g de madera en forma de pequeñas astillas, aserrín o viruta, en un matraz junto con un líquido insoluble en agua, generalmente se utiliza tolueno. Se calienta el matraz, evaporándose el líquido junto con el vapor de agua que se desprende de la madera, el vapor de agua se condensa y se recoge en un recipiente graduado (trampa de condensados), quedando por debajo o encima del otro líquido condensado, según sea más o menos denso que él.

Este método tiene como inconvenientes que requiere el empleo de disolventes caros (tolueno, xilol, tetracloroetano), material de vidrio frágil y costoso, se destruye el material a investigar, el proceso es largo (puede durar aproximadamente 6 horas), es un método que requiere muchos cuidados y precauciones (los disolventes al ser calentados producen desprendimiento de gases fácilmente inflamables y perjudiciales para la salud).

- Aparatos e instrumental
 - Recipiente de destilación.
 - Tubo colector.
 - Refrigerante a reflujo.
 - Plancha de calentamiento eléctrico.



Figura 21. Instrumental del método de extracción con solventes. Imágenes: Los autores

El contenido de agua se determina a partir de la fórmula:

$$f_x \quad \%H = \frac{V}{P_h - P_{H_2O \text{ Condensada}}} \times 100$$

Donde:

$\%H$: Contenido de humedad [%]

V : Volumen de agua colectada [cm^3]

P_h : Peso de la muestra verde [gr.]

$P_{H_2O \text{ Condensada}}$: Peso del agua condensada [gr.], que es igual al V .

Condiciones de la madera según su contenido de humedad

La madera puede encontrarse en varias condiciones o estados de humedad (Figura 22), dependiendo de la cantidad de agua higroscópica y/o libre que en ella estén presentes. Es muy importante definir e identificar esos estados, pues son de uso común en el estudio de las propiedades tecnológicas de la madera.

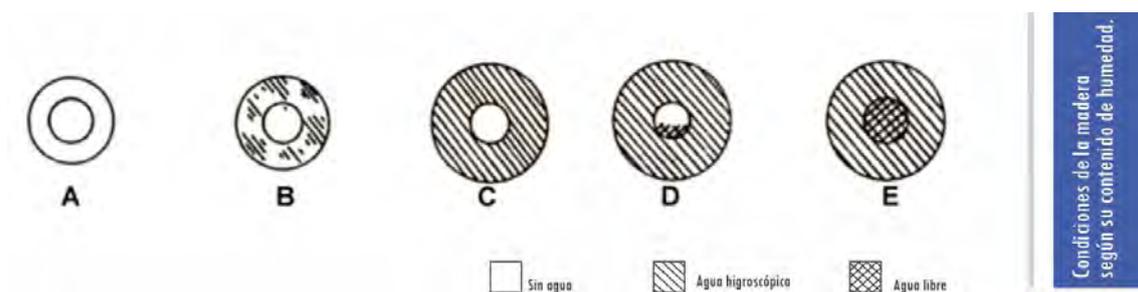


Figura 22. Representación esquemática de las diferentes condiciones de la madera según su contenido de humedad.

Tabla 12. Descripción de la madera según su contenido de humedad.

| CONDICIÓN | Contenido de humedad | Descripción |
|--|----------------------|--|
| Madera en estado anhidro (figura XX. A) | 0 % | Madera que ha permanecido en estufa de laboratorio a una temperatura recomendable de 103 ± 2 °C, hasta registrar un peso constante. En este estado la madera presenta su volumen y peso mínimos. |
| Madera secada al aire (figura XX. B) | 12 % | Es el contenido de humedad al cual se estabiliza la madera con la humedad relativa del medio ambiente que la rodea. |
| Madera en punto de saturación de la fibra (figura XX. C) | 30 % | Se llama punto de saturación de las fibras (PSF), a la condición que se presenta en la madera cuando las fibras o traqueidas tienen sus paredes celulares saturadas de agua higroscópica y los lúmenes no contienen agua libre. En algunos textos también se le denomina “límite higroscópico”. |
| Madera verde (figura XX. D) | Por ejemplo 60 % . | Estado de la madera cuando la pared celular está completamente saturada de agua higroscópica y los lúmenes están parcialmente llenos de agua libre. Es aquí cuando la madera está propensa al ataque de hongos. |
| Madera con su máximo contenido de humedad (figura XX. E) | 36 % a 2000 % | El máximo contenido de humedad (MCH) se presenta cuando la madera es colocada en ambientes demasiado húmedos, como estanques, pilotes de muelles y en general en inmersión en agua durante largo tiempo. El MCH se alcanza cuando las paredes celulares están completamente saturadas de agua higroscópica y los lúmenes llenos de agua libre. |

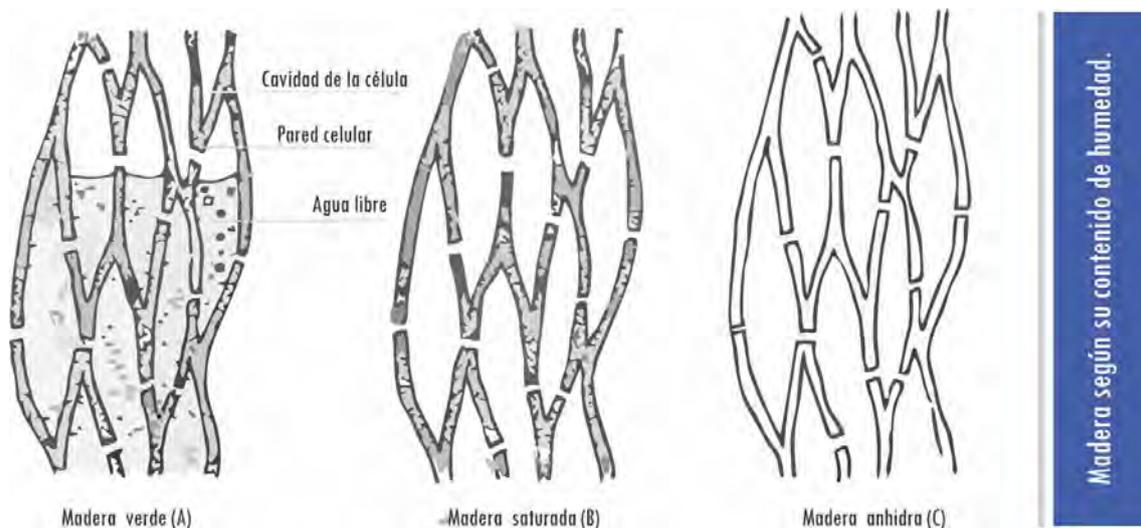


Figura 23. Esquema de las posibles formas de presencia del agua en la madera. Fuente: Fernández- Golfín Seco y Álvarez Nove (1998).

Humedad relativa, humedad absoluta, humedad de equilibrio higroscópico, PSF y MCH

La madera es un material higroscópico y pierde o gana agua en función de la temperatura y la humedad relativa del ambiente en el que se encuentra, hasta que alcanza una situación de equilibrio con el entorno.

En la fabricación de productos de madera el concepto de humedad de equilibrio higroscópico es muy importante, a fin de secar la madera a condiciones de humedad final que permita la estabilidad de este material en el ambiente donde será colocado en uso.

Fuente: Atencia M. E.



El contenido de humedad al cual se estabiliza la madera, en relación a la temperatura " T " y a la humedad relativa " HR " del medio ambiente que la rodea, se conoce como humedad de equilibrio higroscópico " HE ". Si estas condiciones del ambiente que rodea a la madera varían, también variará su humedad de equilibrio higroscópico " HE ".

Humedad relativa del ambiente (HR)

La humedad relativa del aire húmedo es función de la presión de vapor de agua y de la presión de saturación. El aire húmedo se define como una mezcla gaseosa de aire seco y vapor de agua.

El aire ejerce una presión de valor cercano a 760 mm/Hg, que será la suma de la presión ejercida por el aire seco más la ejercida por el vapor de agua. Conforme la cantidad de vapor de agua contenida en el aire crece, también lo hará la presión de vapor, disminuyendo la otra componente, la presión ejercida por el aire seco. En el límite (saturación) esta presión del vapor adquirirá un valor máximo denominado presión de saturación o también presión de vapor saturado. Tanto la presión del vapor como la presión de saturación varían con la temperatura.

Se entiende por humedad relativa del aire al cociente en tanto por ciento, entre la presión parcial de vapor " P_{pv} " y la presión de saturación " P_0 " a una temperatura dada.

$$HR = \frac{P_{pv}}{P_0} \times 100$$

Las variaciones de las tres variables, temperatura " T ", humedad relativa del ambiente " HR " y humedad de equilibrio en la madera " HE ", pueden obtenerse por medio de ábacos como los de la Figura 24 o la tabla 13.

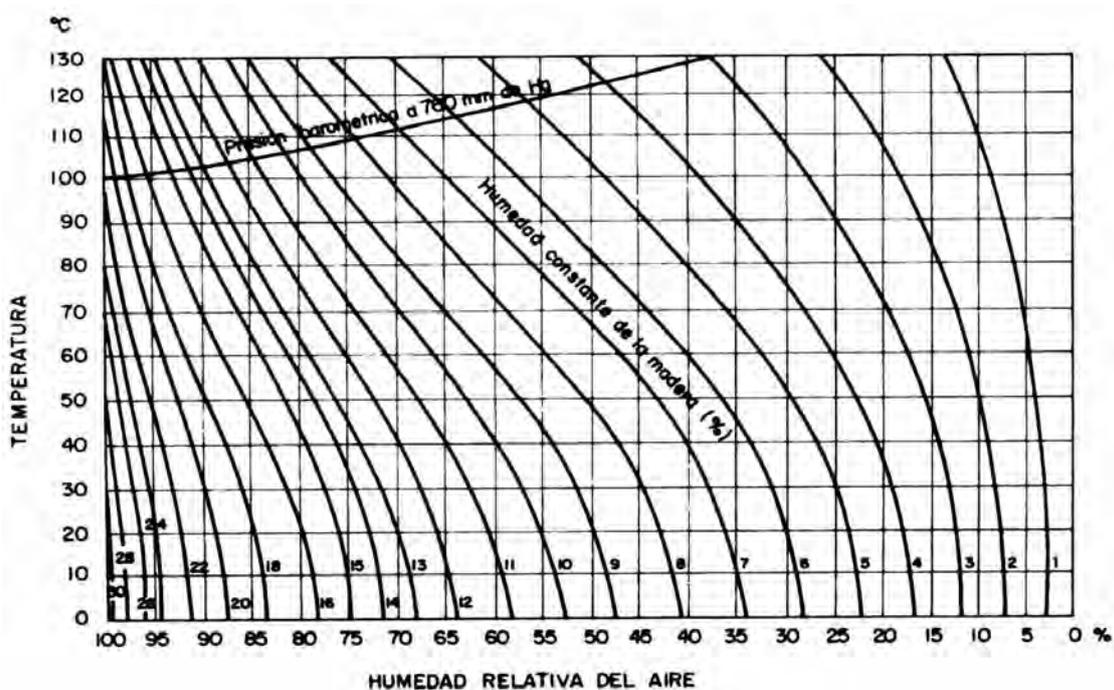


Figura 24. Curvas de humedad de equilibrio para madera de Abeto de Sitka (*Picea sitchensis carr*). Convertida a grados centígrados corregida y extrapolada para temperaturas mayores que 100 °C. Fuente: Kollmann (1959).

Tabla 13. Tabla psicrométrica – humedad relativa del aire en función de las temperaturas del termómetro seco y húmedo.

| BULBO SECO °C | DIFERENCIA PSICROMÉTRICA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|--|--|--|--|--|
| | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 20.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 | | | | | | | |
| 2 | 92 | 83 | 75 | 67 | 59 | 52 | 43 | 36 | 27 | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 93 | 85 | 77 | 70 | 63 | 56 | 48 | 41 | 34 | 28 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 94 | 87 | 80 | 73 | 66 | 60 | 54 | 47 | 41 | 35 | 23 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 94 | 87 | 81 | 74 | 68 | 62 | 56 | 50 | 45 | 39 | 28 | 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 94 | 88 | 82 | 76 | 71 | 65 | 60 | 54 | 49 | 44 | 34 | 23 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 94 | 89 | 84 | 78 | 73 | 68 | 63 | 58 | 53 | 48 | 38 | 30 | 21 | 12 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 95 | 90 | 84 | 79 | 74 | 69 | 65 | 60 | 55 | 51 | 41 | 33 | 24 | 16 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 95 | 90 | 85 | 81 | 76 | 71 | 67 | 62 | 58 | 54 | 45 | 37 | 29 | 21 | 14 | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 95 | 90 | 86 | 82 | 78 | 73 | 69 | 69 | 61 | 57 | 49 | 42 | 35 | 27 | 20 | 13 | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 96 | 91 | 87 | 82 | 78 | 74 | 70 | 66 | 62 | 58 | 51 | 44 | 36 | 30 | 23 | 17 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 96 | 92 | 87 | 83 | 79 | 75 | 72 | 68 | 64 | 60 | 53 | 46 | 40 | 34 | 27 | 21 | 16 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 96 | 92 | 89 | 85 | 81 | 77 | 74 | 70 | 66 | 63 | 56 | 49 | 43 | 37 | 31 | 26 | 21 | 14 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 96 | 92 | 89 | 85 | 81 | 77 | 74 | 71 | 67 | 64 | 57 | 51 | 45 | 39 | 34 | 28 | 23 | 18 | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 96 | 92 | 89 | 85 | 82 | 78 | 75 | 72 | 68 | 65 | 59 | 53 | 47 | 42 | 37 | 31 | 26 | 21 | 17 | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 96 | 93 | 89 | 86 | 82 | 79 | 76 | 73 | 70 | 67 | 61 | 55 | 50 | 44 | 39 | 35 | 30 | 24 | 20 | 16 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | 96 | 93 | 90 | 86 | 83 | 80 | 77 | 74 | 71 | 68 | 62 | 56 | 51 | 46 | 41 | 36 | 32 | 27 | 23 | 19 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | 97 | 93 | 90 | 87 | 84 | 81 | 77 | 74 | 71 | 69 | 63 | 58 | 53 | 48 | 43 | 38 | 34 | 30 | 26 | 22 | 18 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | 97 | 93 | 90 | 87 | 84 | 81 | 78 | 75 | 72 | 70 | 64 | 59 | 54 | 50 | 45 | 41 | 36 | 32 | 28 | 24 | 21 | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | 97 | 94 | 90 | 87 | 84 | 81 | 79 | 76 | 73 | 70 | 65 | 60 | 56 | 51 | 46 | 42 | 38 | 34 | 30 | 26 | 23 | 16 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | 97 | 94 | 91 | 88 | 85 | 82 | 79 | 76 | 74 | 71 | 66 | 61 | 57 | 52 | 48 | 44 | 40 | 36 | 32 | 29 | 25 | 19 | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | 97 | 94 | 91 | 88 | 85 | 82 | 80 | 77 | 74 | 72 | 67 | 62 | 58 | 53 | 49 | 45 | 41 | 38 | 34 | 31 | 27 | 21 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | 97 | 94 | 91 | 88 | 86 | 83 | 80 | 77 | 75 | 73 | 68 | 63 | 59 | 54 | 50 | 47 | 43 | 39 | 36 | 32 | 29 | 23 | 17 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46 | 97 | 94 | 91 | 89 | 86 | 83 | 81 | 78 | 76 | 73 | 68 | 64 | 60 | 55 | 52 | 48 | 44 | 41 | 37 | 34 | 31 | 25 | 19 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 48 | 97 | 94 | 92 | 89 | 86 | 84 | 81 | 78 | 76 | 74 | 69 | 65 | 61 | 56 | 53 | 49 | 45 | 42 | 39 | 35 | 33 | 27 | 21 | 16 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 97 | 94 | 92 | 89 | 87 | 84 | 82 | 79 | 77 | 75 | 70 | 65 | 62 | 57 | 54 | 50 | 47 | 43 | 40 | 37 | 34 | 28 | 23 | 18 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 52 | 97 | 94 | 92 | 89 | 87 | 84 | 82 | 79 | 77 | 75 | 70 | 66 | 62 | 58 | 55 | 51 | 48 | 44 | 41 | 38 | 35 | 30 | 25 | 20 | 16 | 11 | | | | | | | | | | | | | | |
| 54 | 97 | 95 | 92 | 90 | 87 | 85 | 82 | 80 | 78 | 76 | 71 | 67 | 63 | 59 | 56 | 52 | 49 | 45 | 42 | 39 | 36 | 31 | 26 | 21 | 17 | 13 | | | | | | | | | | | | | | |
| 56 | 97 | 95 | 92 | 90 | 87 | 85 | 83 | 80 | 78 | 76 | 72 | 68 | 64 | 60 | 57 | 53 | 50 | 46 | 43 | 40 | 38 | 32 | 27 | 23 | 19 | 15 | 11 | | | | | | | | | | | | | |
| 58 | 97 | 95 | 93 | 90 | 88 | 85 | 83 | 80 | 79 | 77 | 72 | 68 | 64 | 61 | 57 | 54 | 51 | 47 | 44 | 42 | 39 | 33 | 29 | 24 | 20 | 16 | 12 | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | 98 | 95 | 93 | 90 | 88 | 86 | 83 | 81 | 79 | 77 | 73 | 69 | 65 | 62 | 58 | 55 | 52 | 48 | 45 | 43 | 40 | 35 | 30 | 26 | 21 | 18 | 14 | 11 | | | | | | | | | | | | |
| 62 | 98 | 95 | 93 | 91 | 88 | 86 | 84 | 81 | 79 | 78 | 73 | 69 | 66 | 62 | 59 | 56 | 53 | 49 | 46 | 43 | 41 | 36 | 31 | 27 | 23 | 19 | 15 | 12 | | | | | | | | | | | | |
| 64 | 98 | 95 | 93 | 91 | 88 | 86 | 84 | 82 | 80 | 78 | 74 | 70 | 66 | 63 | 59 | 56 | 53 | 50 | 47 | 44 | 42 | 37 | 32 | 28 | 24 | 20 | 17 | 13 | | | | | | | | | | | | |
| 66 | 98 | 95 | 93 | 91 | 89 | 86 | 84 | 82 | 80 | 78 | 74 | 70 | 67 | 64 | 60 | 57 | 54 | 51 | 48 | 45 | 43 | 38 | 33 | 29 | 25 | 21 | 18 | 15 | 12 | | | | | | | | | | | |
| 68 | 98 | 95 | 93 | 91 | 89 | 87 | 85 | 82 | 81 | 79 | 75 | 71 | 67 | 64 | 61 | 58 | 55 | 52 | 49 | 46 | 44 | 39 | 34 | 30 | 26 | 22 | 19 | 16 | 13 | | | | | | | | | | | |
| 70 | 98 | 96 | 93 | 91 | 89 | 87 | 85 | 83 | 81 | 79 | 75 | 71 | 68 | 65 | 61 | 58 | 55 | 52 | 50 | 47 | 44 | 40 | 35 | 31 | 27 | 23 | 20 | 17 | 14 | 11 | | | | | | | | | | |
| 72 | 98 | 96 | 94 | 92 | 89 | 87 | 85 | 83 | 81 | 80 | 76 | 72 | 69 | 65 | 62 | 59 | 56 | 53 | 50 | 48 | 45 | 40 | 36 | 32 | 28 | 24 | 21 | 18 | 15 | 12 | | | | | | | | | | |
| 74 | 98 | 96 | 94 | 92 | 90 | 87 | 85 | 83 | 82 | 80 | 76 | 72 | 69 | 66 | 63 | 60 | 57 | 54 | 51 | 48 | 46 | 41 | 37 | 33 | 29 | 25 | 22 | 19 | 16 | 13 | 11 | | | | | | | | | |
| 76 | 98 | 96 | 94 | 92 | 90 | 88 | 86 | 84 | 82 | 80 | 76 | 73 | 70 | 66 | 63 | 60 | 57 | 54 | 52 | 49 | 47 | 42 | 38 | 34 | 30 | 26 | 23 | 20 | 17 | 14 | 12 | | | | | | | | | |
| 78 | 98 | 96 | 94 | 92 | 90 | 88 | 86 | 84 | 82 | 81 | 77 | 73 | 70 | 67 | 64 | 61 | 58 | 55 | 52 | 50 | 47 | 43 | 38 | 34 | 30 | 27 | 24 | 21 | 18 | 15 | 13 | 10 | | | | | | | | |
| 80 | 98 | 96 | 94 | 92 | 90 | 88 | 86 | 84 | 83 | 81 | 77 | 74 | 71 | 67 | 64 | 61 | 58 | 56 | 53 | 50 | 48 | 43 | 39 | 35 | 31 | 28 | 24 | 22 | 19 | 16 | 14 | 11 | | | | | | | | |
| 82 | 98 | 96 | 94 | 92 | 90 | 88 | 86 | 84 | 83 | 81 | 77 | 74 | 71 | 68 | 65 | 62 | 59 | 56 | 54 | 51 | 49 | 44 | 40 | 36 | 32 | 29 | 25 | 22 | 20 | 17 | 15 | 12 | 10 | | | | | | | |
| 84 | 98 | 96 | 94 | 92 | 90 | 88 | 86 | 85 | 83 | 81 | 78 | 74 | 71 | 68 | 65 | 62 | 59 | 57 | 54 | 52 | 49 | 45 | 40 | 37 | 33 | 29 | 26 | 23 | 20 | 18 | 16 | 13 | 11 | | | | | | | |
| 86 | 98 | 96 | 94 | 92 | 91 | 89 | 87 | 85 | 83 | 82 | 78 | 75 | 72 | 69 | 66 | 63 | 60 | 57 | 55 | 52 | 50 | 45 | 41 | 37 | 34 | 30 | 27 | 24 | 21 | 19 | 16 | 14 | 12 | | | | | | | |
| 88 | 98 | 96 | 95 | 93 | 91 | 89 | 87 | 85 | 83 | 82 | 78 | 75 | 72 | 69 | 66 | 63 | 60 | 58 | 55 | 53 | 51 | 46 | 42 | 38 | 34 | 31 | 28 | 25 | 22 | 19 | 17 | 15 | 13 | | | | | | | |
| 90 | 98 | 97 | 95 | 93 | 91 | 89 | 87 | 85 | 84 | 82 | 79 | 76 | 73 | 69 | 67 | 64 | 61 | 58 | 56 | 53 | 51 | 47 | 42 | 39 | 35 | 32 | 28 | 26 | 23 | 20 | 18 | 16 | 14 | | | | | | | |
| 92 | 98 | 97 | 95 | 93 | 91 | 89 | 87 | 86 | 84 | 82 | 79 | 76 | 73 | 70 | 67 | 64 | 61 | 59 | 56 | 54 | 52 | 47 | 43 | 39 | 36 | 32 | 29 | 26 | 24 | 21 | 19 | 16 | 14 | | | | | | | |
| 94 | 99 | 97 | 95 | 93 | 91 | 89 | 88 | 86 | 84 | 83 | 79 | 76 | 73 | 70 | 67 | 65 | 62 | 59 | 57 | 54 | 52 | 48 | 44 | 40 | 36 | 33 | 30 | 27 | 24 | 22 | 19 | 17 | 15 | | | | | | | |
| 96 | 99 | 97 | 95 | 93 | 91 | 90 | 88 | 86 | 84 | 83 | 80 | 76 | 74 | 70 | 68 | 65 | 62 | 60 | 57 | 55 | 53 | 48 | 44 | 41 | 37 | 34 | 31 | 28 | 25 | 22 | 20 | 18 | 16 | | | | | | | |
| 98 | 99 | 97 | 95 | 93 | 92 | 90 | 88 | 86 | 85 | 83 | 80 | 77 | 74 | 71 | 68 | 65 | 63 | 60 | 58 | 55 | 53 | 49 | 45 | 41 | 38 | 34 | 31 | 28 | 26 | 23 | 21 | 19 | | | | | | | | |

Humedad absoluta

Se entiende por humedad absoluta a la masa de agua asociada a cada kilogramo de aire seco, o como es más normal, referido a volumen, es decir, a metros cúbicos. Existen ábacos que permiten calcular la cantidad de vapor de agua en gramos existente en un metro cúbico de aire a una temperatura y humedad relativa dadas, así como la capacidad de absorción de vapor de agua residual que tiene dicho aire, también en g/m^3 .

Madera en el Punto de Saturación de las Fibras (PSF)

El punto de saturación de las fibras es el grado de humedad que presenta la madera cuando se encuentra en equilibrio con una atmósfera saturada de vapor.

Para un 30 % de humedad de equilibrio en la madera, que es considerado el valor promedio del PSF para las maderas latifoliadas y coníferas, corresponde un 100 % de humedad relativa en el ambiente, a una temperatura constante entre 20 °C y 25 °C.

Los cambios en el contenido de humedad de la madera por arriba del PSF casi no tiene efecto sobre las propiedades, a diferencia de la variación de la humedad por debajo de ese valor, por ejemplo la resistencia de la madera a la mayoría de los esfuerzos mecánicos es máxima en el estado anhidro y mínima en el punto de saturación de las fibras, en donde para valores superiores, las variaciones ya no son significativas.



El PSF puede definirse físicamente como el contenido de humedad en la madera cuando la presión parcial de vapor " P_{pv} " en la pared celular iguala a la presión de vapor saturado " P_0 " en la pared celular.

Máximo contenido de humedad (MCH)

Se alcanza el máximo contenido de humedad cuando las paredes celulares están completamente saturadas de agua higroscópica y los lúmenes llenos de agua libre. La cantidad de agua libre que pueda contener la madera varía de acuerdo al tipo y especie, el rango es del 36 % del peso seco para las maderas pesadas y hasta cerca de 1000 % para las muy ligeras.

Por ejemplo, el agua libre de la madera balsa (*Ochroma spp*) a su máximo contenido de humedad es del orden de 750 %.

$$MCH = \text{porcentaje de agua higroscópica} + \text{porcentaje de agua libre}$$

Si el porcentaje de agua higroscópica es igual a 28 %, entonces

$$MCH = 0,28 + \frac{1,5 - r_0}{1,5 \times r_0} \times 100$$

Gradiente de humedad de la madera

Al colocar una pieza de madera húmeda en contacto con el ambiente seco, las diferencias entre las presiones parciales de vapor de la atmósfera y del agua contenida en la madera, da lugar a la evaporación del agua presente en las capas superficiales, mientras que las capas internas permanecen aún húmedas. La humedad que se establece entre el contenido de humedad de la madera en el centro y en la superficie, se denomina gradiente de humedad y da origen a la circulación interna del agua desde el centro a la periferia y es la causa del secado de la madera. Mientras más elevado sea el gradiente de humedad más rápido secará la madera, e inversamente, si el gradiente es bajo el tiempo de secado se prolongará (Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas, 1989).

Es de gran importancia establecer un gradiente de humedad óptimo, que reduzca el tiempo de secado a un mínimo sin correr el riesgo de ocasionar daños en la madera.

En la Figura 25 se muestra el cambio del contenido de humedad durante el secado, en relación al espesor (sección transversal), de un tablón de madera de haya.



Figura 25. Cambio del contenido de humedad durante el secado, en relación al espesor (sección transversal), de una tabla de madera (según H. BRUNNER – HILDEBRAND, R. F. A. citados por Pan *et al.*, 2009).

Variación de la humedad en el árbol

En el árbol, la distribución de la humedad presenta variaciones interespecíficas, variaciones intraespecíficas y variaciones dentro del mismo árbol.

Las diferencias de humedad entre especies se deben a las características anatómicas y a su peso específico. Las maderas más pesadas contendrán menor cantidad de agua por presentar un mayor porcentaje del volumen ocupado por materia sólida, e inversamente, las más ligeras pueden contener y presentar una mayor cantidad de agua.

En la variación del contenido de humedad en el árbol influyen las precipitaciones, el clima y humedad del terreno. Además, dentro de un mismo árbol, las raíces presentan mayor porcentaje de humedad, después las ramas y por último el fuste. Si se considera al fuste en su plano transversal, la albura contiene más agua que el duramen, siendo más marcadas estas diferencias en las coníferas. En latifoliadas esta diferencia es más estrecha debido a que, la albura presenta células activas conductoras y el duramen elementos muertos y muchas veces ocupados por inclusiones.

En el cálculo del peso específico, la contribución del peso del agua en el peso total de la madera puede darse en cantidades considerables. Además, el volumen de la madera puede variar de acuerdo con sus contenidos de humedad y por lo tanto, también variará el peso específico.

Ejercicios de aplicación: humedad



Ejercicio 12: El peso seco y el peso húmedo de una muestra de madera son de 32 gr y de 39 gr respectivamente. Determinar la humedad en base seca de la muestra.

Resolución: El contenido de humedad en base seca, es la cantidad de agua que existe en una pieza de madera, expresada como el porcentaje del peso de ésta en condición totalmente seca (anhidra) y se calcula mediante la fórmula:



$$\mu = \frac{P_{\mu} - P_0}{P_0} \cdot 100$$

μ : contenido de humedad en base seca [%]

P_{μ} : Peso de la madera húmeda [gr.]

P_0 : Peso de la madera anhidra [gr.]

Para resolver el ejercicio reemplazamos en la fórmula los valores de peso seco y peso húmedo que nos dan de datos y realizamos el cálculo.

$$\mu = \frac{P_{\mu} - P_0}{P_0} \cdot 100 = \frac{39 - 32}{32} \cdot 100 = 21,9 \%$$



Ejercicio 13: Determinar el peso de madera seca que se obtiene al introducir 53 Kg de madera con 76 % de humedad, en una estufa a 100 °C hasta alcanzar peso constante.

Resolución: Usando la fórmula en base seca y considerando que el peso constante nos indica que la madera perdió toda el agua, o sea está en estado anhidro, lo que haremos será despejar nuestro P_0 de la fórmula y reemplazar los respectivos valores que nos dan de datos.



Como necesitamos expresar nuestra μ en unidades, lo que haremos es dividir el valor en porcentaje que nos dan de dato entre 100.

$$\mu = \frac{P_{\mu} - P_0}{P_0} \cdot 100 \Rightarrow P_0 = \frac{P_{\mu}}{1 + \mu} \cdot 100 = \frac{53 \text{ kg}}{1 + 76/100} = 30,1 \text{ kg}$$



Ejercicio 14: Calcular la humedad en base seca de una muestra de madera cuyo contenido de humedad en base húmeda es de 17 %.

Resolución: La metodología para resolver este ejercicio es la misma a la utilizada en el ejercicio anterior, solo que en este caso utilizaremos la fórmula siguiente:

$$\mu = \frac{x}{1-x} \cdot 100 = \frac{0,17}{1-0,17} \cdot 100 = 20,5\%$$



Ejercicio 15: Encontrar el peso inicial de una muestra de madera cuyo contenido de humedad en base seca es 29 % y su peso anhidro es de 127 kg. Expresar el contenido de humedad en base húmeda y en ambas, indicar cuánto representa en peso la madera seca y cuánto el agua.

Resolución: La metodología para resolver este ejercicio es similar a la utilizada en el ejercicio N° 13, solo que en este caso despejaremos P_μ , nos queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{P_\mu - P_0}{P_0} \cdot 100 \Rightarrow P_\mu = P_0 \cdot (1 + u) \cdot 100 \\ &= 127kg \cdot (1 + 29/100) = 163,83kg \end{aligned}$$



Ejercicio 16: Determine el máximo contenido de humedad de una madera de $r_0 = 0,75 \text{ g/cm}^3$

Resolución: Para determinar el máximo contenido de humedad se debe usar la siguiente fórmula:

$$MCH = 0,28 + \frac{1,50 - r_0}{1,50 \times r_0} \times 100$$

Reemplazamos el valor de peso específico que se da como dato:

$$MCH = \left(0,28 + \frac{1,50 - 0,75}{1,50 \times 0,75} \right) \times 100 = 94,67\%$$



Ejercicio 17: Determine la humedad relativa para un ambiente donde se registra una temperatura seca de 44°C y una caída térmica de 3°C.

Resolución: Para encontrar el valor de humedad relativa para un ambiente se utilizan Tablas psicrométricas (tabla 13), que dan el valor de la humedad relativa del aire en función de la temperatura del aire y de la diferencia entre el termómetro seco y el húmedo.



Se ubican en la tabla el valor del bulbo seco que me dan de dato y el de caída térmica que se encuentra en la parte horizontal superior. Donde coinciden, allí se encuentra el valor de humedad relativa. El valor de humedad relativa que se obtiene es $HR = 83\%$.

| BULBO SECO °C | DIFERENCIA PSICROMÉTRICA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|--|--|--|--|--|
| | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 | | | | | | | |
| 2 | 92 | 83 | 75 | 67 | 59 | 52 | 43 | 36 | 27 | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 93 | 85 | 77 | 70 | 63 | 56 | 48 | 41 | 34 | 28 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 94 | 87 | 80 | 73 | 66 | 60 | 54 | 47 | 41 | 35 | 23 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 94 | 87 | 81 | 74 | 68 | 62 | 56 | 50 | 45 | 39 | 28 | 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 94 | 88 | 82 | 76 | 71 | 65 | 60 | 54 | 49 | 44 | 34 | 23 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 94 | 89 | 84 | 78 | 73 | 68 | 63 | 58 | 53 | 48 | 38 | 30 | 21 | 12 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 95 | 90 | 84 | 79 | 74 | 69 | 65 | 60 | 55 | 51 | 41 | 33 | 24 | 16 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 95 | 90 | 85 | 81 | 76 | 71 | 67 | 62 | 58 | 54 | 45 | 37 | 29 | 21 | 14 | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 95 | 90 | 86 | 82 | 78 | 73 | 69 | 69 | 61 | 57 | 49 | 42 | 35 | 27 | 20 | 13 | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 96 | 91 | 87 | 82 | 78 | 74 | 70 | 66 | 62 | 58 | 51 | 44 | 36 | 30 | 23 | 17 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 96 | 92 | 87 | 83 | 79 | 75 | 72 | 68 | 64 | 60 | 53 | 46 | 40 | 34 | 27 | 21 | 16 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 96 | 92 | 89 | 85 | 81 | 77 | 74 | 70 | 66 | 63 | 56 | 49 | 43 | 37 | 31 | 26 | 21 | 14 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 96 | 92 | 89 | 85 | 81 | 77 | 74 | 71 | 67 | 64 | 57 | 51 | 45 | 39 | 34 | 28 | 23 | 18 | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 96 | 92 | 89 | 85 | 82 | 78 | 75 | 72 | 68 | 65 | 59 | 53 | 47 | 42 | 37 | 31 | 26 | 21 | 17 | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 96 | 93 | 89 | 86 | 82 | 79 | 76 | 73 | 70 | 67 | 61 | 55 | 50 | 44 | 39 | 35 | 30 | 24 | 20 | 16 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | 96 | 93 | 90 | 86 | 83 | 80 | 77 | 74 | 71 | 68 | 62 | 56 | 51 | 46 | 41 | 36 | 32 | 27 | 23 | 19 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | 97 | 93 | 90 | 87 | 84 | 81 | 77 | 74 | 71 | 69 | 63 | 58 | 53 | 48 | 43 | 38 | 34 | 30 | 26 | 22 | 18 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | 97 | 93 | 90 | 87 | 84 | 81 | 78 | 75 | 72 | 70 | 64 | 59 | 54 | 50 | 45 | 41 | 36 | 32 | 28 | 24 | 21 | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | 97 | 94 | 90 | 87 | 84 | 81 | 79 | 76 | 73 | 70 | 65 | 60 | 56 | 51 | 46 | 42 | 38 | 34 | 30 | 26 | 23 | 16 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | 97 | 94 | 91 | 88 | 85 | 82 | 79 | 76 | 74 | 71 | 66 | 61 | 57 | 52 | 48 | 44 | 40 | 36 | 32 | 29 | 25 | 19 | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | 97 | 94 | 91 | 88 | 85 | 82 | 80 | 77 | 74 | 72 | 67 | 62 | 58 | 53 | 49 | 45 | 41 | 38 | 34 | 31 | 27 | 21 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | 97 | 94 | 91 | 88 | 86 | 83 | 80 | 77 | 75 | 73 | 68 | 63 | 59 | 54 | 50 | 47 | 43 | 39 | 36 | 32 | 29 | 23 | 17 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46 | 97 | 94 | 91 | 89 | 86 | 83 | 81 | 78 | 76 | 73 | 68 | 64 | 60 | 55 | 52 | 48 | 44 | 41 | 37 | 34 | 31 | 25 | 19 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 48 | 97 | 94 | 92 | 89 | 86 | 84 | 81 | 78 | 76 | 74 | 69 | 65 | 61 | 56 | 53 | 49 | 45 | 42 | 39 | 35 | 33 | 27 | 21 | 16 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 97 | 94 | 92 | 89 | 87 | 84 | 82 | 79 | 77 | 75 | 70 | 65 | 62 | 57 | 54 | 50 | 47 | 43 | 40 | 37 | 34 | 28 | 23 | 18 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 52 | 97 | 94 | 92 | 89 | 87 | 84 | 82 | 79 | 77 | 75 | 70 | 66 | 62 | 58 | 55 | 51 | 48 | 44 | 41 | 38 | 35 | 30 | 25 | 20 | 16 | 11 | | | | | | | | | | | | | | |

SORCIÓN EN MADERAS

Sorción en maderas

La sorción, también llamada adsorción, es un fenómeno físico de superficie y se define como la capacidad que tiene un material sólido poroso e higroscópico de captar o adsorber humedad del medio ambiente que lo rodea hasta llegar a un equilibrio con él.

El proceso inverso, la desorción, es el fenómeno por el cual la madera como material presenta una pérdida de humedad cuando se encuentra expuesta a un medio ambiente con humedades relativas decrecientes.

Tanto la sorción (adsorción) como la desorción se producen en el rango de higroscopicidad, entre el 0 % y el punto de saturación de las fibras (28 al 30 %) cuando las paredes celulares de la madera están saturadas de agua higroscópica o adsorbida y en los lúmenes de las células no hay presencia de agua libre.



Con respecto a la sorción en madera, este proceso es muy importante ya que determina el comportamiento de la misma cuando está expuesta a diferentes condiciones ambientales, donde coexisten tres variables que pueden afectar su estabilidad dimensional y su uso posterior: temperatura, humedad relativa y humedad de equilibrio.

Concepto y tipos de sorción en madera

La adsorción de agua en la madera se debe a las fuerzas de sorción, éstas son de diferente naturaleza. Según la instancia de la franja de humedad higroscópica (desde el 0 % hasta *PSF*), la sorción puede dividirse en tres etapas:

- Sorción química (hasta 6 % u 8 % de humedad de equilibrio en la madera).
- Adsorción – BET (entre 12 % y 15 % de humedad de equilibrio en la madera).
- Condensación capilar (por arriba del 15 %).

Esta división en etapas se realiza para poder explicar el modelo de sorción, pues las distintas fuerzas de sorción pueden actuar simultáneamente.

Sorción química

Una pieza de madera en estado anhidro ($\mu = 0\%$), al ingresar en un ambiente con humedad se produce una interacción físico química del tipo de "Fuerza de Van der Waal" entre los grupos hidroxilos (OH) de la celulosa, hemicelulosa y lignina de la pared celular y las moléculas de vapor de agua del ambiente, quedando unidos por puentes de hidrógeno. La sorción química finaliza cuando teóricamente toda la superficie interna accesible queda cubierta con una capa monomolecular de agua.

Sorción BET

Si los contenidos de humedad en el ambiente siguen aumentando, la madera continuará incorporando humedad como vapor de agua en las micelas de la pared celular, que presentan una gran superficie interna. Dentro de la pared celular existe un sistema capilar submicroscópico que ofrece toda una escala de grietas intermicelares e intramicelares, por lo tanto la superficie interna no puede considerarse plana sino quebrada, de manera que existen capilares con monocapa y otros con varias capas (6 - 7 capas).

Formada la monocapa, continua la fijación de las moléculas de vapor de agua en nuevas capas sobre la primera. Se concibe las fuerzas de adsorción de ésta etapa como fuerzas eléctricas y no como fuerzas químicas.

Condensación capilar

Simultáneamente, con el proceso de formación de multicapas se produce la condensación del vapor de agua en los capilares de la pared celular, fenómeno que predomina a humedades relativas superiores al 60 %, donde se produce una brusca elevación de la isoterma (figura 26) hasta llegar a una humedad relativa del aire del 100 %. Este punto crítico se denomina "Punto de Saturación de las Fibras" (PSF) y determina el límite entre el agua libre y el agua higroscópica o adsorbida.

La condensación del vapor de agua en los capilares de la pared celular se produce porque la tensión de vapor saturado (P_0) en el lado cóncavo del menisco, es menor que la presión de vapor correspondiente al líquido (P_{pv}) a la misma temperatura cuando presenta una superficie plana. O sea, cuanto menor es el radio del capilar, mayor será el descenso de la tensión de vapor.

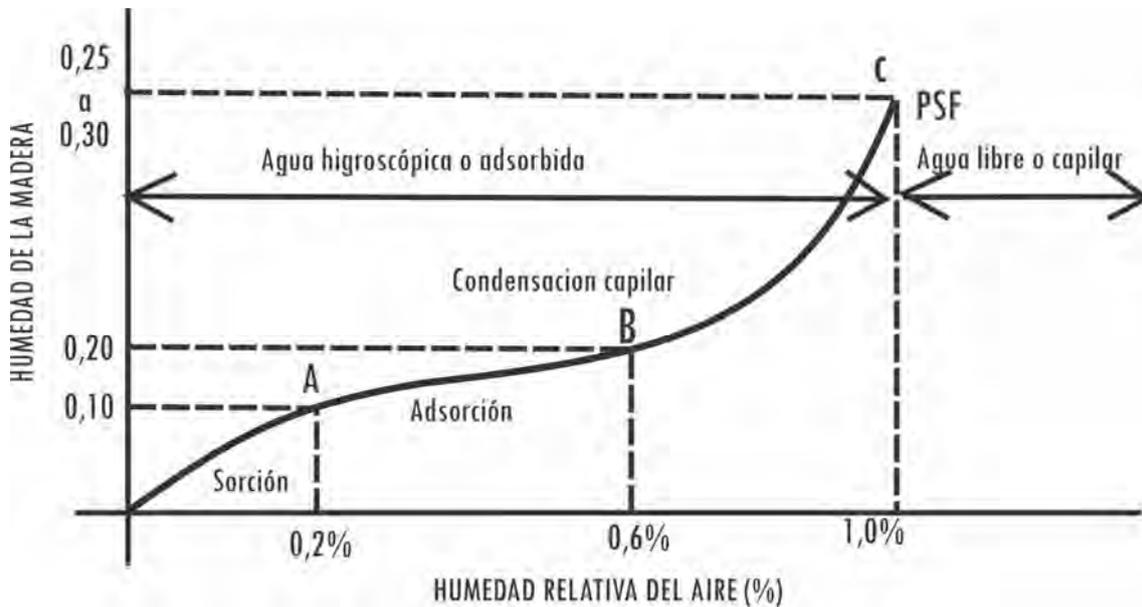


Figura 26. Isoterma higroscópica característica de las maderas. Fuente: Cátedra de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera. FCF – UNSE.

Estas isotermas de adsorción adquieren una forma sigmoidea si se utiliza como adsorbato un líquido o vapor con propiedades humectantes (Skaar, 1972). Mediante estas curvas de equilibrio se explican los fenómenos que ocurren en una pieza de madera completamente seca que está en contacto con un medio ambiente de atmósfera normal a) sorción; b) adsorción; c) condensación capilar.

Teóricamente a 100 % de humedad relativa, la humedad de la madera es de 30 %. En la figura 26, el tramo de la isoterma desde el punto 0 hasta A, es característico de todo proceso de sorción en monocapa, el de A hasta B corresponde a la adsorción física - eléctrica (multicapa) y el de B a C es propio de la condensación capilar.

Cada madera tiene su isoterma característica, esto es debido a varios factores. Sin embargo la comparación entre las isotermas de humedad de diferentes maderas, ha demostrado que las desviaciones son insignificantes sobre todo para humedades relativas del aire moderadas y bajas, presentándose diferencias en las proximidades del punto de saturación de las fibras, como se observa en la figura 26.

A continuación, en la Figura 27 se observa la isoterma de sorción – desorción de la especie *Melia azedarach* var *gigantea*.

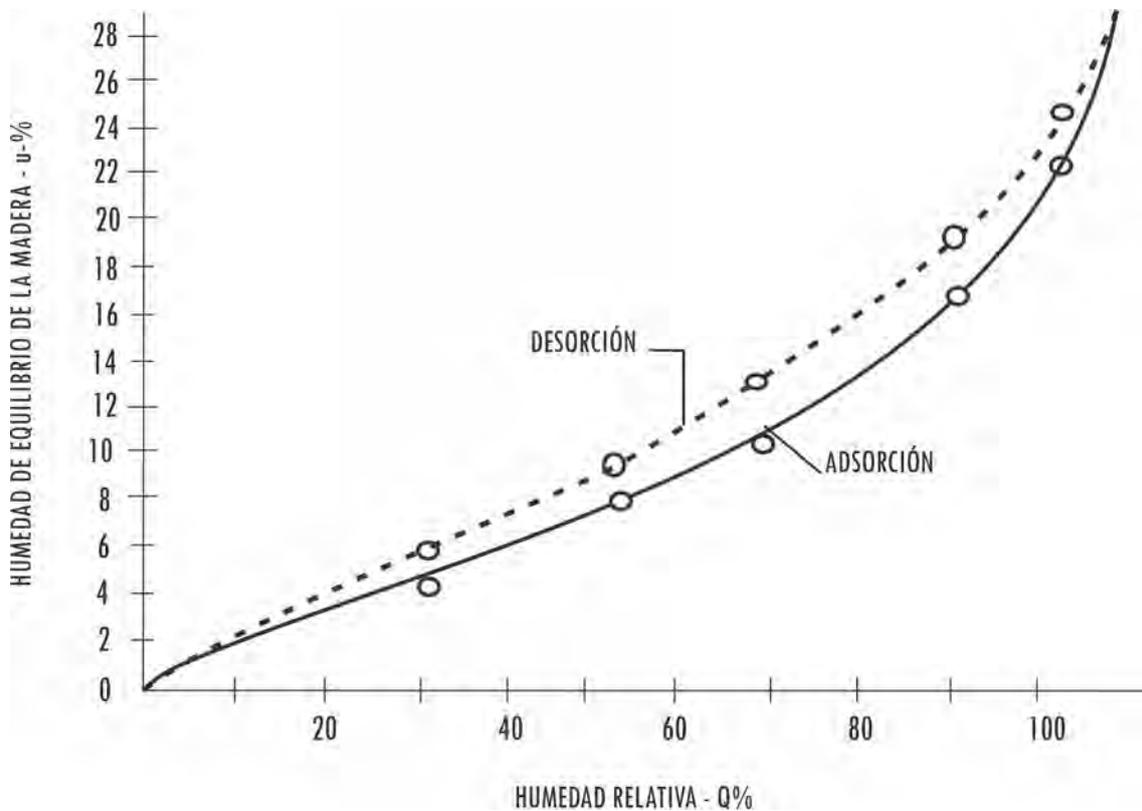


Figura 27. Isotermas de sorción, para los procesos de adsorción y desorción en sp. *Melia azedarach* var *gigantea*.

Fuente: Coronel y Pan (1990).

Histéresis de sorción

La curva que se observa en la figura 28 corresponde a los valores de humedad de la madera en equilibrio con la humedad del aire hasta el punto de saturación de las fibras, o sea, dentro del rango higroscópico. La curva superior corresponde al equilibrio cuando la madera se seca desde el punto de saturación de las fibras y se denomina "curva de desorción" (1). La inferior es la "curva de sorción" (2) que inversamente, se refiere al equilibrio cuando la madera seca toma humedad del ambiente.

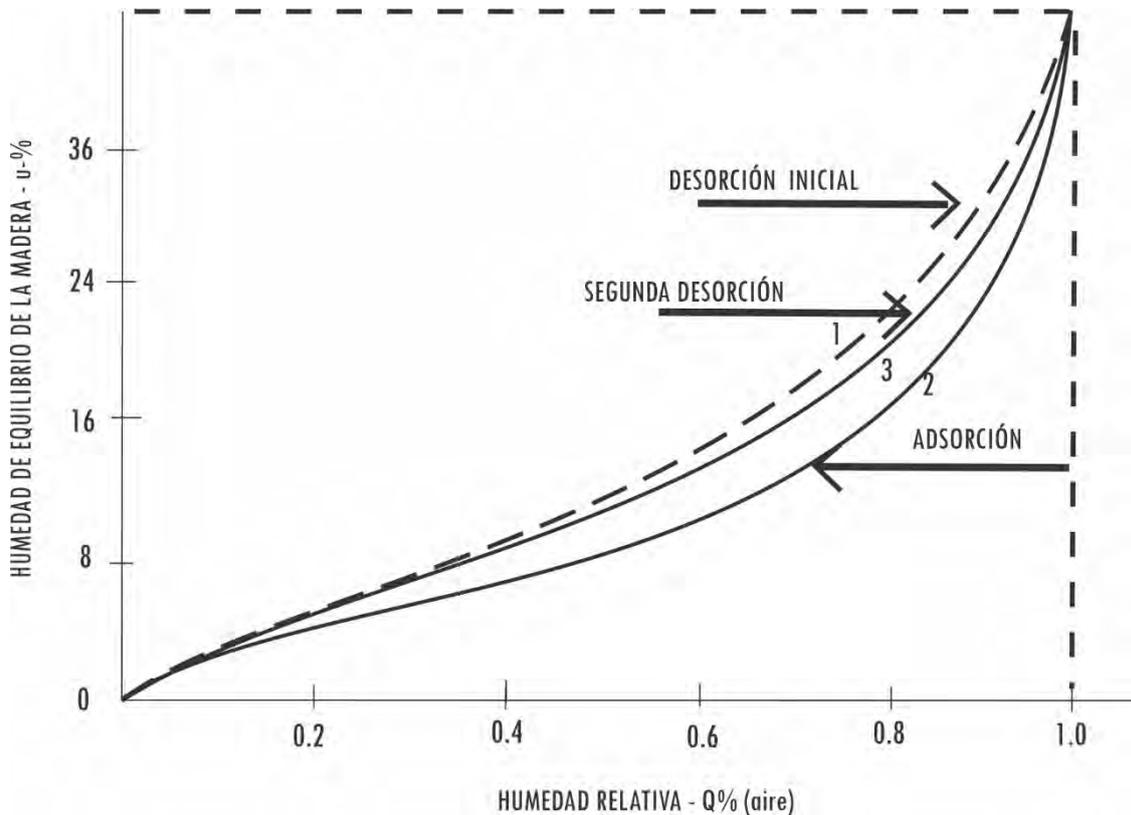


Figura 28. Isoterma de sorción - desorción para Abeto Douglas. Fuente: Rasmussen (1961).

El fenómeno anterior por el cual, a una presión de vapor determinada, la humedad es mayor cuando pasa del estado húmedo al seco, respecto al proceso inverso (del estado seco al húmedo), se denomina "Histéresis".

Si se toma madera verde, recién cortada, sin ningún tratamiento previo y se la lleva al equilibrio con atmósferas a presiones de vapor de agua cada vez más reducidas, se obtiene graficando los valores, una curva como la 1 de la figura anterior. Si la madera es llevada ahora a atmósferas de humedades relativas crecientes, los puntos de equilibrio siguen la curva 2, que es la "Isoterma de sorción o adsorción". Si se efectúa la desorción nuevamente, ésta sigue ahora la curva 3 y repitiendo el ciclo indefinidamente, siempre se seguirán las curvas 2 y 3. La curva 3, en el caso de la madera, se superpone a la 1 para humedades relativas del 50 % o menores.

La primera curva de sorción es irreversible y esto es, un fenómeno general de todas las fibras tomadas de un material altamente hinchado, como las fibras de la madera.

El equilibrio con el vapor de agua se puede establecer en cualquier punto. Por ejemplo, en la figura 29, se observa que si se provoca la desorción a partir del punto A, se

llega al punto *B* de la curva de desorción; si se parte del punto *C* y se provoca la sorción se llega al punto *D* de la curva de adsorción.

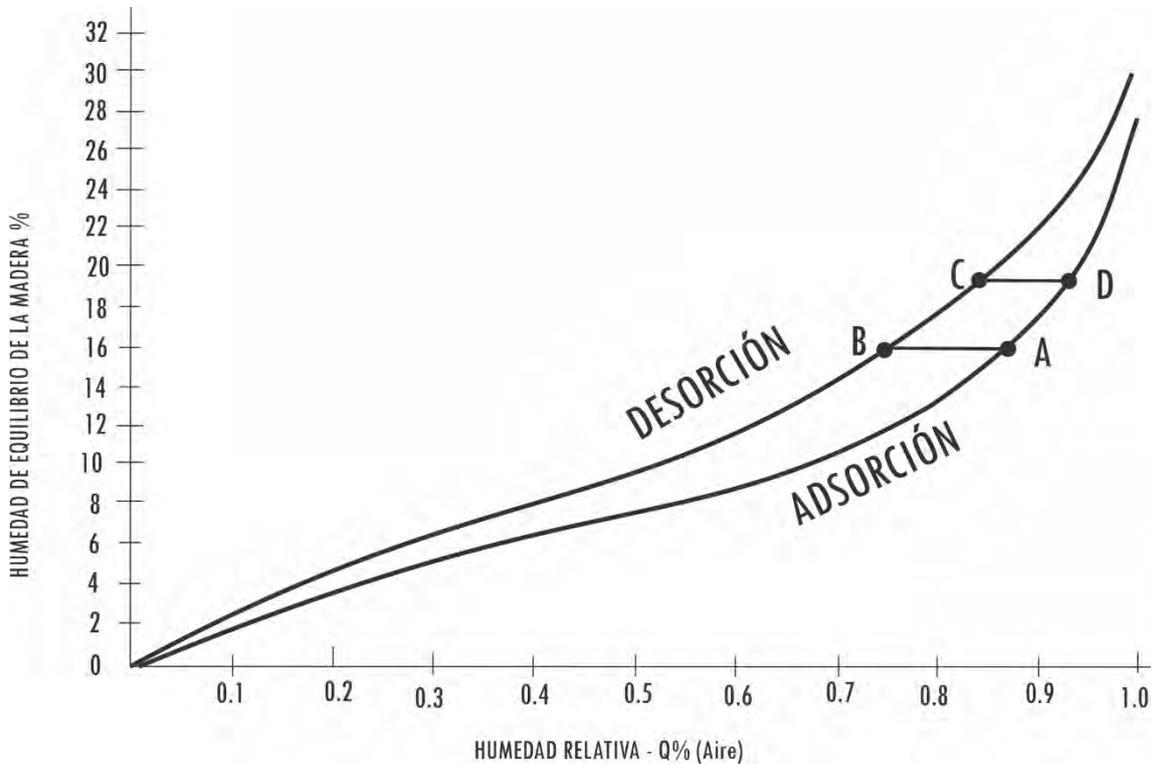


Figura 29. Ciclo de Sorción – Desorción. Fuente: Rasmussen (1961).

Sin embargo, la relación sorción-desorción, que se denomina “coeficiente de histéresis”, varía muy poco en las diversas maderas y dependiendo de la madera y temperatura, está entre:

$$\frac{A}{B} = 0,8 - 0,9$$

El efecto de histéresis decrece con la temperatura y cerca de 100 °C la relación se aproxima a 1, suponiéndose por lo tanto que a mayor temperatura éste desaparece.

Teoría sobre la Histéresis de Sorción

Teoría de Urquhart (1927)

Este autor considera que cuando el material leñoso, completamente seco, es llevado al equilibrio con atmósfera de humedades crecientes, las moléculas de agua son adsorbidas y causan el hinchado del reticulado, rompiendo enlaces secundarios de puentes de hidrógeno y originando que el número de hidroxilos capaces de actuar como centros activos de sorción

aumenten con el aumento de la humedad relativa. Al realizar la desorción, el material se contrae, pero la vuelta a la estructura original es ahora impedida por la persistencia del agua unida en los nuevos centros de sorción, creados en la primera adsorción. De aquí que exista un mayor porcentaje de humedad remanente en el material en la desorción para una misma humedad relativa.

La histéresis, es entonces, un retraso mecánico en la respuesta de la estructura de la madera, causada por una fuerte sorción de moléculas de agua en sitios geoméricamente importantes.

La irreversibilidad de la primera desorción deriva del hecho de que en la fibra de madera nativa no secada, el agua está distribuida más o menos homogéneamente en toda la estructura fibrilar, durante el crecimiento y en el primer secado, se produce una cristalización irreversible por uniones entre puentes de hidrógeno entre hidroxilos de las cadenas celulósicas.

Determinación experimental de las isotermas de sorción

Método de las soluciones salinas

El método consiste en colocar una pequeña muestra de madera en un desecador. Se desea encontrar el equilibrio higroscópico entre la humedad relativa del ambiente, la temperatura y la humedad de equilibrio de la madera a determinar. Este equilibrio se alcanza después de un cierto tiempo, cuando el peso de la muestra deja de variar. De esta manera se obtiene cada punto de la isoterma de sorción o desorción.

La obtención de determinadas humedades relativas del aire en el desecador, se consigue por medio de soluciones salinas saturadas, a determinadas concentraciones. Los requisitos para ello son:

- Solución salina saturada.
- Agitación continua de la solución salina para evitar la caída de la concentración.
- Agitación del aire que se encuentra sobre la superficie de la solución para que la humedad relativa de ese aire sea constante.
- Temperatura constante del sistema.

- A continuación, se presentan las siguientes soluciones salinas a determinadas concentraciones y la humedad relativa conseguida a una temperatura de 20 °C.

| Tabla 15. Soluciones salinas a determinadas concentraciones y la humedad relativa conseguida a una temperatura de 20 °C | |
|--|---|
| Solución salina (óxidos, bases, etc.) | Humedad relativa del aire en % (a 20 °C) |
| (Agua) | (100) |
| Sulfato de Potasio (K ₂ SO ₄) | 97,10 |
| Sulfato de Zinc (ZnSO ₄) | 90,00 |
| Cloruro de Potasio (KCl) | 85,00 |
| Cloruro de Sodio (NaCl) | 75,00 |
| Bromuro de Sodio (NaBr) | 57,70 |
| Carbonato de Potasio (K ₂ CO ₃) | 42,80 |
| Cloruro de Calcio (CaCl ₂) | 32,20 |
| Acetato de Potasio (CH ₃ COOK) | 20,00 |
| Cloruro de Zinc (ZnCl ₂) | 10,00 |
| Hidróxido de Potasio (KOH) | 7,00 |
| Hidróxido de Sodio (NaOH) | 3,00 |
| Cloruro de Calcio seco (CaCl ₂) | 2,50 |
| Pentóxido de Difósforo (P ₂ O ₅) | 0,00 |

Método en cámara de climatización

- Se debe disponer de una cámara de climatización eléctrica en la que se regule la temperatura y la humedad relativa del aire. Son aparatos tipo portátiles con capacidad de hasta 0,4 m³. Es un método muy utilizado en la actualidad por su funcionalidad y exactitud, pero oneroso debido al elevado costo del equipo climatizador.

Procedimiento:

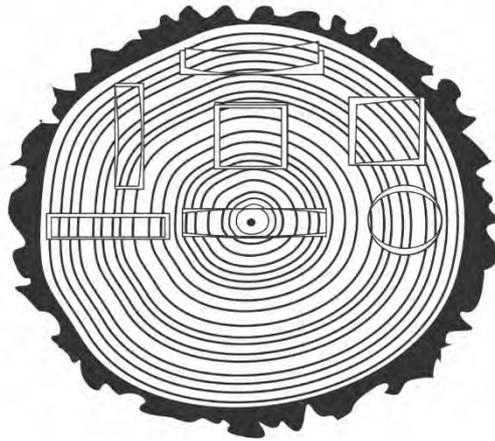
- Se obtienen probetas según Normas DIN 52184.

- Se estabilizan las probetas en ambiente con $HR = 65 \%$ y $T = 25^{\circ}C$. Se pesan en balanza analítica (precisión $0,01 \text{ g}$), se determinan sus dimensiones radial, tangencial y longitudinal (precisión $0,01 \text{ mm}$).
- Se obtiene el peso anhidro y las dimensiones radial, tangencial y longitudinal en estado anhidro por medio de estufa eléctrica.
- Se introducen las probetas en la cámara de climatización y durante el proceso de adsorción se mantienen en contacto con diferentes climas de humedades relativas crecientes (35% , 50% , 65% , 85% , 96%) y temperatura constante ($25^{\circ}C$), hasta que se produce el equilibrio en cada uno de estos ambientes, logrando cada madera un valor de humedad de equilibrio diferente según la especie estudiada.
- Durante el proceso de adsorción, cada probeta antes de ingresar a una nueva fase se pesa en una balanza analítica y se miden sus dimensiones con tornillo micrométrico o calibre.
- Con los datos obtenidos de la exposición de la madera en los diferentes climas, se grafica la isoterma de adsorción.

CONTRACCIÓN E HINCHAMIENTO

CONTRACCIÓN E HINCHAMIENTO

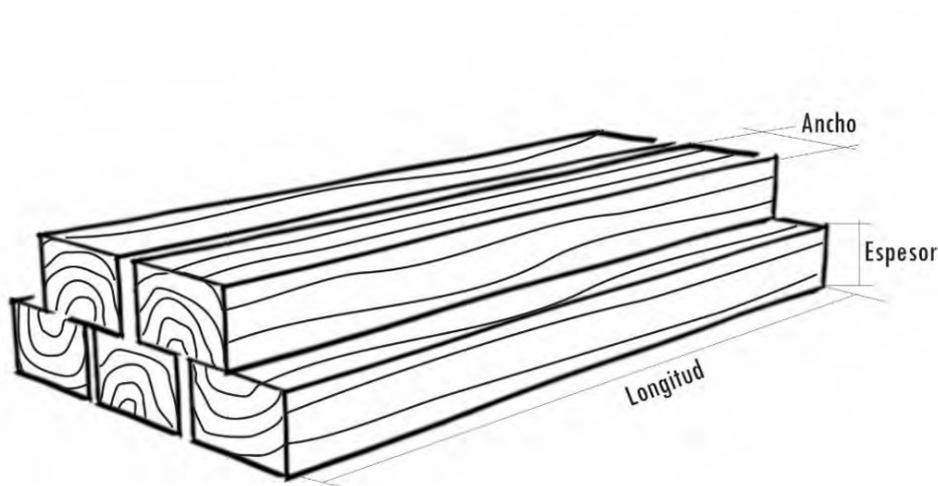
El proceso de hinchamiento y contracción de la madera hace referencia a los cambios en las dimensiones de las piezas de madera, como consecuencia de la transferencia de agua entre el material y el medio ambiente que lo rodea, tendiente a buscar una condición de equilibrio higroscópico.



Efectos de la contracción en la madera según su posición

Figura 30. Efectos de la contracción en la madera según su posición tangencial, radial o mixta en el fuste
Fuente: Fernández-Golfin Seco, J. I. y Alvarez Noves, H. (1998.)

El punto de saturación de las fibras (*PSF*) es aquel donde la madera no posee agua libre en los espacios intercelulares y celulares, sin embargo, las paredes de las fibras se encuentran saturadas. El proceso de hinchamiento se produce entre un contenido de humedad de 0% y el *PSF*. La contracción ocurre cuando las paredes celulares pierden humedad por debajo del *PSF*, para el cual normalmente el agua contenida toma un valor comprendido entre el 28% y el 30% de la masa anhidra.



Identificación de las dimensiones lineales de tablas

Figura 31. Identificación de las dimensiones lineales de tablas de madera con diferentes escuadrías (espesor y ancho).

Contracción

Es la disminución de dimensiones y/o volumen de una pieza de madera, causada por la disminución del contenido de humedad a partir del *PSF*. Se la conoce como “contracción normal” y que se simboliza en este texto con “ β ”.

Hinchamiento

Es el aumento de las dimensiones y/o volumen de una pieza de madera en estado anhidro, que debido a las condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente que la rodea aumentará su contenido de humedad. Se la conoce como “hinchamiento normal” de la madera y se simboliza en este texto con “ α ”.

Determinación de la contracción e hinchamiento de la madera

Tanto la contracción como el hinchamiento se determinan volumétricamente y linealmente en las direcciones tangencial, radial y longitudinal (Figura 32).

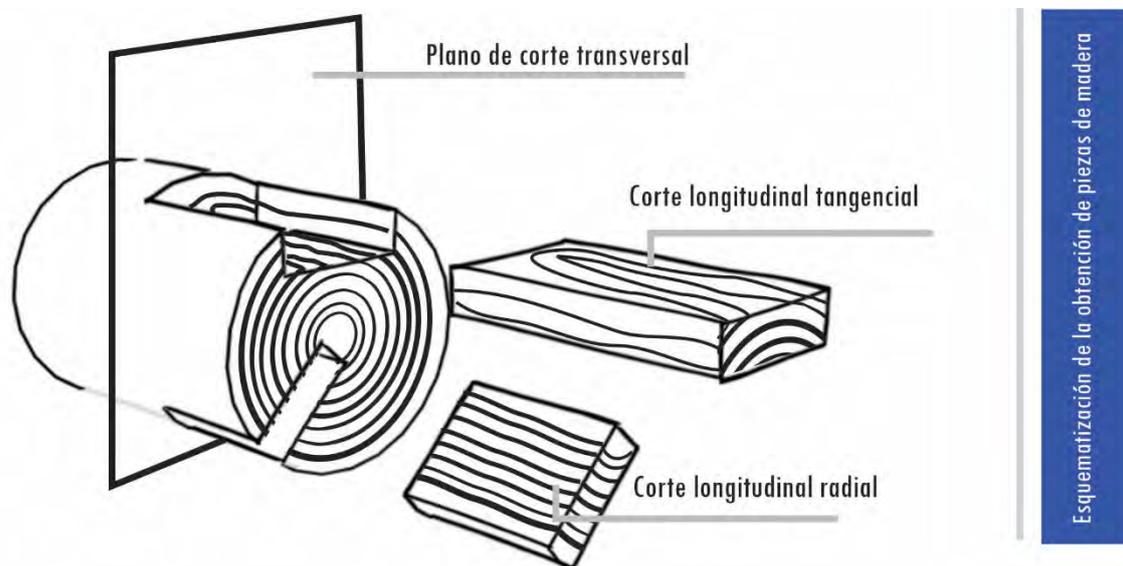


Figura 32. Esquematización de la obtención de piezas de madera del tipo radial y del tangencial.

Investigaciones demostraron que un aumento de volumen en la madera, desde el estado anhidro hasta un valor determinado de humedad, es proporcional al aumento del contenido de humedad (μ) y al peso específico aparente anhidro (ρ_0) (Skaar, 1972, citado por Pan et al., 2009). La relación matemática que lo describe es la siguiente:

f_x

$$\alpha_v = \mu \cdot r_0 \text{ (\%)}$$

Donde:

α_v : Coeficiente de hinchamiento volumétrico desde $\mu = 0 \%$ hasta $\mu = \mu \%$.

μ : Humedad de la madera en estado anhidro.

r_0 : Peso específico aparente anhidro.

Contracción e hinchamiento volumétrico máximo.

La contracción volumétrica máxima (β_{vmax}) ocurre desde el *PSF* hasta el 0 % de humedad y está dada por la ecuación:

f_x

$$\beta_{vmax} = \mu_{PSF} \cdot r_{PSF} \text{ (\%)}$$

Donde:

β_{vmax} : Coeficiente de contracción volumétrico máximo desde el *PSF* hasta 0 % de humedad.

μ_{PSF} : Contenido de humedad en el *PSF*

r_{PSF} : Peso específico aparente en el *PSF*.

La contracción volumétrica máxima también se determina de la siguiente manera:

f_x

$$\beta_{vmax} = \frac{V_\mu - V_0}{V_\mu} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

Donde:

β_{vmax} : Coeficiente de contracción volumétrica máxima.

V_μ : Volumen de la madera en estado de saturación.

V_0 : Volumen de la madera en estado anhidro.

Por su lado, el hinchamiento volumétrico máximo (α_{vmax}) está dado por:

f_x

$$\alpha_{vmax} = \mu_{PSF} \cdot r_0 \text{ (\%)}$$

Donde:

β_{vmax} : Coeficiente de contracción volumétrico máximo desde el *PSF* hasta el 0 % de humedad.

μ_{PSF} : Contenido de humedad en el *PSF*

r_0 : Peso específico aparente anhidro.

El hinchamiento volumétrico máximo de una madera se determina también mediante la diferencia de volúmenes entre el estado de máxima saturación y anhidro:

f_x

$$\alpha_{vmax} = \frac{V_\mu - V_0}{V_0} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

Donde

α_{vmax} : Coeficiente de hinchamiento volumétrico máximo.

V_μ : Volumen de la madera en estado de saturación.

V_0 : Volumen de la madera en estado anhidro.

Relación entre la contracción y el hinchamiento volumétrico máximo

A partir de la contracción volumétrica máxima se puede determinar el hinchamiento volumétrico máximo y viceversa. La relación entre ellos es la siguiente:

f_x

$$\beta_{vmax} = \frac{\alpha_{vmax}}{1 + \alpha_{vmax}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

$$\alpha_{vmax} = \frac{\beta_{vmax}}{1 - \beta_{vmax}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

Contracciones e hinchamientos lineales

Conocer la magnitud de la contracción o del hinchamiento volumétrico máximo no es suficiente para describir la medida de los cambios dimensionales que tienen lugar en la madera. Debido al carácter anisotrópico de este material es importante definir las contracciones e hinchamientos lineales en las direcciones radial (*rd*) y tangencial (*tg*), ya que son diferentes (Figura 33).

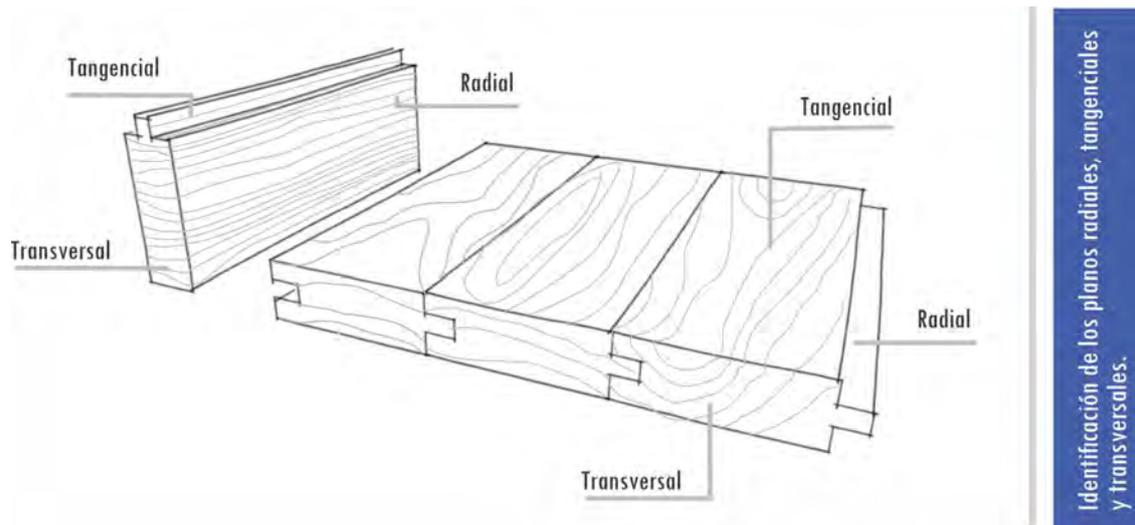


Figura 33. Identificación de los planos radiales, tangenciales y transversales en piezas de madera.

Contracciones lineales totales

La contracción lineal de una pieza de madera que seca desde el estado verde "*v*" hasta un contenido de humedad "*μ*" cualquiera, está determinada por la expresión:

$$f_x \quad \beta_{tg} = \frac{L_{tgv} - L_{tg\mu}}{L_{tgv}} \cdot 100 (\%) \quad y \quad \beta_{rd} = \frac{L_{rdv} - L_{rd\mu}}{L_{rdv}} \cdot 100 (\%)$$

Donde

β_{tg} y β_{rd} : Coeficientes de contracción lineal tangencial y lineal radial respectivamente, a un determinado contenido de humedad.

L_{tgv} y L_{rdv} : Dimensión de la pieza de madera en sentido tangencial y radial respectivamente, a un porcentaje de humedad verde "*v*".

$L_{tg\mu}$ y $L_{rd\mu}$: Nueva dimensión de la pieza de madera en sentido tangencial y radial respectivamente, a un "*μ*" porcentaje de humedad.

Hinchamientos lineales totales

El hinchamiento lineal de una pieza de madera en un sentido determinado (α_{tg} o α_{rd}), que adsorbe agua desde un contenido de humedad " μ " hasta un valor " v ", está dado por la siguiente ecuación:

$$f_x \quad \alpha_{tg} = \frac{L_{tgv} - L_{tg\mu}}{L_{tg0}} \cdot 100 (\%) \quad y \quad \alpha_{rd} = \frac{L_{rdv} - L_{rd\mu}}{L_{rd0}} \cdot 100 (\%)$$

Donde

α_{tg} y α_{rd} : Coeficientes de hinchamiento lineal tangencial y lineal radial respectivamente, a un determinado contenido de humedad.

L_{tgv} y L_{rdv} : Nueva dimensión de la pieza de madera en sentido tangencial y radial respectivamente, a un " v " porcentaje de humedad.

$L_{tg\mu}$ y $L_{rd\mu}$: Dimensión original de la pieza de madera en sentido tangencial y radial respectivamente, a un " μ " porcentaje de humedad.

L_{tg0} y L_{rd0} : Dimensión de la pieza de madera en estado anhidro.

En la figura 34 se indica de manera esquemática la contracción de la madera respecto su posición radial o tangencial en el fuste o troza, y la medición en probetas de ese cambio dimensional lineal.

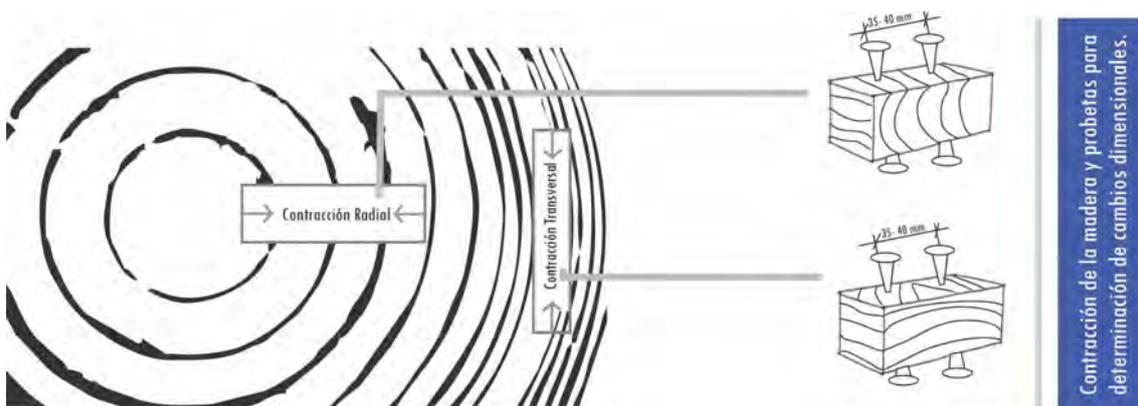


Figura 34. Contracción de la madera y probetas para determinación de cambios dimensionales. Fuente: Spavento et al. (2008).

Fórmulas de hinchamiento y contracción volumétrica en maderas

A partir de las magnitudes obtenidas para la contracción y el hinchamiento lineal, puede determinarse la contracción e hinchamiento volumétrico respectivos, mediante las siguientes ecuaciones:

$$f_x \quad \alpha_v = (1 + \alpha_{tg})(1 + \alpha_{rd})(1 + \alpha_{lng}) - 1 (\%)$$
$$\beta_v = 1 - (1 - \beta_{tg})(1 - \beta_{rd})(1 - \beta_{lng})(\%)$$

La Norma IRAM N° 9543 propone la simplificación de las ecuaciones anteriores de la siguiente manera:

$$\alpha_v = \alpha_{tg} + \alpha_{rd} + \alpha_{lng}$$

$$\beta_v = \beta_{tg} + \beta_{rd} + \beta_{lng}$$

Tanto para maderas de coníferas como latifoliadas, los coeficientes de contracción e hinchamiento volumétricos y lineales, oscilan entre los siguientes valores mínimos y máximos:

α_v coeficiente de hinchamiento volumétrico: 7,00 a 22,00 %.

β_v Coeficiente de contracción volumétrica: 7,00 a 22,00 %.

α_{tg} Coeficiente de hinchamiento tangencial: 3,60 a 15,00 %.

β_{tg} coeficiente de contracción tangencial: 3,60 a 15,00 %.

α_{rd} coeficiente de hinchamiento radial: 1,50 a 7,00 %.

β_{rd} coeficiente de contracción radial: 1,50 a 7,00 %.

α_{lng} coeficiente de hinchamiento longitudinal: 0,15 a 0,55 %.

β_{lng} coeficiente de contracción longitudinal: 0,15 a 0,55 %.

La figura 35 muestra la relación entre el contenido de humedad " μ " de la madera y el hinchamiento volumétrico máximo " α_{vmax} " de diferentes especies madereras (Coronel, 1989).

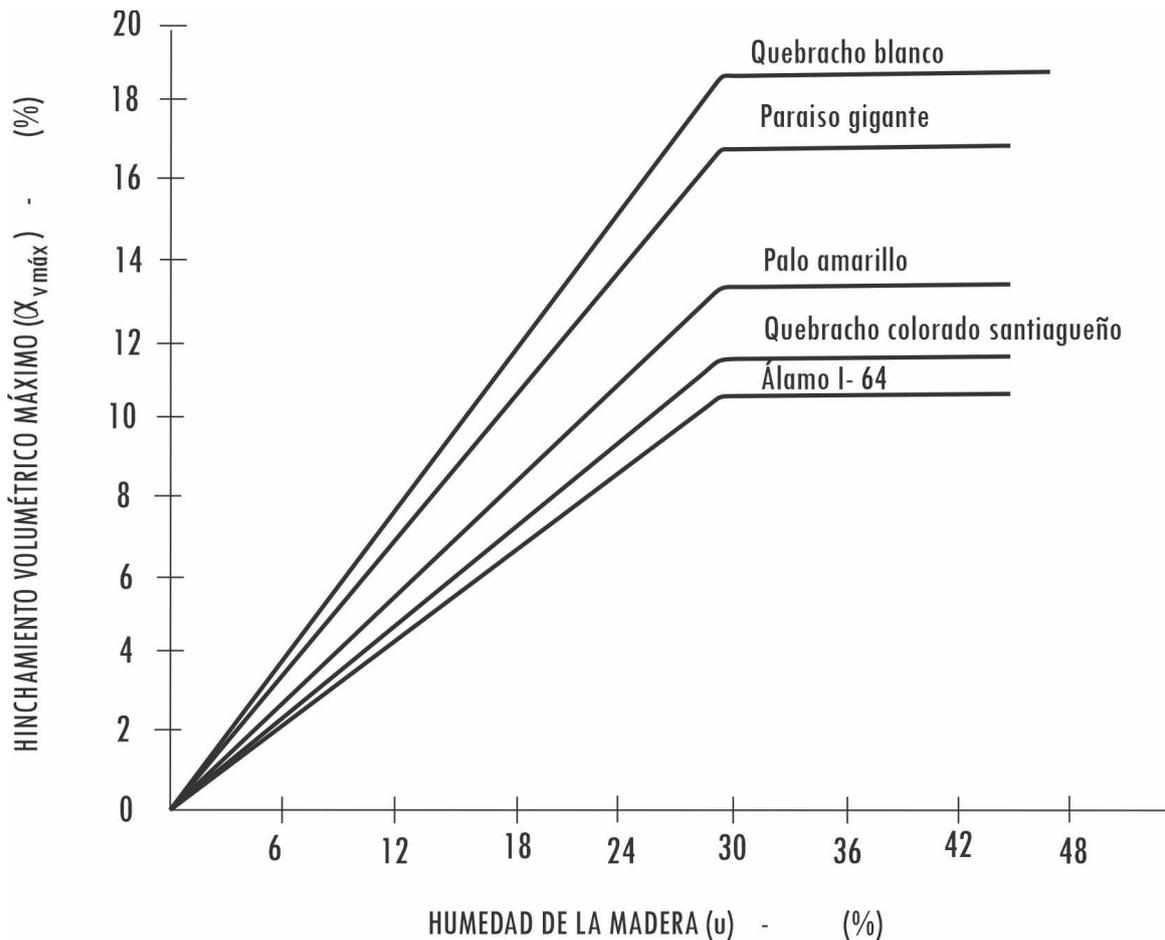


Figura 35. Hinchamiento volumétrico máximo " α_{vmax} " de diferentes especies madereras. Fuente: Coronel (1989).

Coefficiente de contracción diferencial y de hinchamiento diferencial

Normalmente la madera no se encuentra expuesta a cambios atmosféricos extremos, por el contrario, en la práctica los cambios dimensionales ocurren cuando la madera pasa desde un estado verde hasta el contenido de humedad final, el cual está determinado por el uso que se le va a dar.

En los procesos industriales se presenta un secado artificial hasta un 8 % a 12 % en secadero y 15 % al aire libre. Además, la madera estará expuesta a cambios cíclicos normales debido a las variaciones en la humedad relativa del aire de la zona donde estará puesta en uso. Los cambios dimensionales cíclicos, contracciones e hinchamientos sucesivos, se denominan "movimiento" o "juego" de la madera.

Para conocer el juego de una madera, o bien para saber si tiene buena estabilidad dimensional, se puede obtener una estimación aproximada mediante el "coeficiente de retractabilidad" o "contracción diferencial", cuando la madera está expuesta a un medio

ambiente donde pierde humedad; o "hinchamiento diferencial" cuando la madera gana humedad del medio ambiente.

Este coeficiente de retractabilidad mide la variación de volumen de la madera cuando la misma sufre una variación del 1% de humedad, por debajo del punto de saturación de las fibras. Este coeficiente es característico de cada madera.

$$f_x \quad q_\beta = \frac{\Delta\beta_\mu}{\Delta\mu} = \frac{\frac{l_{12} - l_0}{l_{12}}}{\frac{P_{12} - P_0}{P_0}} = \frac{(l_{12} - l_0)P_0}{(P_{12} - P_0)l_{12}}$$

Donde

q_β : Coeficiente de contracción diferencial.

β_μ : Contracción de la madera a un contenido de humedad μ .

μ : Contenido de humedad al que se determinó la contracción.

l_0 y l_{12} = Dimensión de la probeta al 0 % y 12 % de humedad.

P_0 y P_{12} = Peso de la muestra al 0 % y 12 % de humedad.

La relación lineal que existe entre el hinchamiento de la madera con el aumento del contenido de humedad del estado anhidro hasta el punto de saturación de las fibras, nos permite estimar el "Hinchamiento Diferencial", que es el hinchamiento que sufre la madera por cada grado de humedad que gane.

$$f_x \quad q_\alpha = \frac{\Delta\alpha_\mu}{\Delta\mu} = \frac{\frac{l_{12} - l_0}{l_0}}{\frac{P_{12} - P_0}{P_0}} = \frac{(l_{12} - l_0)P_0}{(P_{12} - P_0)l_{12}}$$

Donde

q_α : Coeficiente de hinchamiento diferencial.

α_μ : Hinchamiento de la madera a su contenido de humedad μ .

μ : Contenido de humedad al que se determinó el hinchamiento.

l_0 y l_{12} = Dimensión de la probeta al 0 % y 12 % de humedad.

P_0 y P_{12} = Peso de la muestra al 0 % y 12 % de humedad.

El coeficiente de retractabilidad (q_β o q_α) tiene un valor que varía desde 0 a 1, donde 0 corresponde a maderas que no son nerviosas y de buena estabilidad dimensional, 1 corresponde a maderas muy nerviosas e inestables dimensionalmente.

Anisotropía de la contracción y del hinchamiento

Las microfibrillas que forman la pared celular se colocan en mayor proporción a lo largo del eje de la célula o fibra. Al eliminar el agua de la madera, las microfibrillas tienden a unirse entre sí y como consecuencia la pared celular se contraerá más en el sentido transversal. En el sentido longitudinal de la fibra la contracción también se presenta, pero en un mínimo grado debido a la ligera inclinación que tienen las microfibrillas en la pared celular.

La madera es un material anisotrópico, es decir, sus propiedades físicas y mecánicas se manifiestan con diferente intensidad según el plano que se trate (axial, radial y tangencial).

Teniendo en cuenta que en el sentido longitudinal se encuentran colocados la gran mayoría los elementos anatómicos de la madera, y dado que en este sentido individualmente se contraen poco, la madera también tendrá una contracción mínima (0,1 a 0,9%).

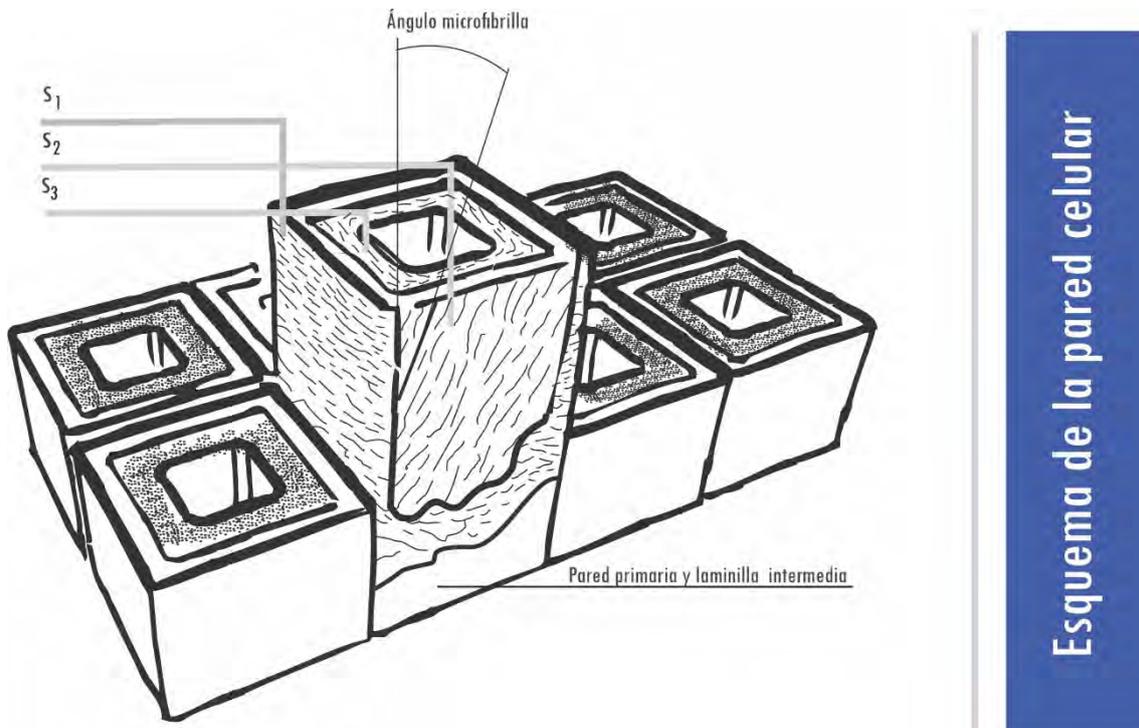


Figura 36. Esquema de las distintas capas de la pared celular y de la orientación de las microfibrillas.

En el sentido transversal, la contracción aumenta considerablemente, aunque también entre la dirección radial y tangencial se presentan diferencias. La razón es que: en la dirección radial, se encuentran algunas fibras dispuestas al largo sobre su eje axial (radios leñosos), y como éstos elementos a lo largo se contraen poco, influyen en disminuir la contracción en el sentido radial de la madera.

En cambio, en el sentido tangencial, la contracción de elementos tanto axiales como los radiales, se realiza transversalmente en forma libre.

Aunque la magnitud de la contracción es muy variable, según el tipo de madera se puede enunciar una media de 14% para la volumétrica, 7% para la tangencial y 4% para la axial. Existe una relación de 2 a 1 entre la contracción tangencial y radial, la contracción axial es una décima de la radial.

La Anisotropía Dimensional (A) de Hinchamiento (A_h) o de la Contracción (A_c), es la relación entre los movimientos lineales tangencial y radial, o sea:

$$A_c = \frac{\text{Contracción Tangencial Total}}{\text{Contracción Radial Total}} = \frac{\beta_{tg}}{\beta_{rd}}$$

$$A_h = \frac{\text{Hinchamiento Tangencial Total}}{\text{Hinchamiento Radial Total}} = \frac{\alpha_{tg}}{\alpha_{rd}}$$

Existe una relación entre las medidas de la contracción o hinchamiento tangencial y la contracción o hinchamiento radial, expresada por la ecuación:

$$\beta_{tg} = 1,66 \cdot \beta_{rd} \quad \text{entonces} \quad \frac{\beta_{tg}}{\beta_{rd}} = 1,66$$

Maderas con un valor de A de 1,20 hasta 1,5, son consideradas excelentes y utilizadas para empleos que no permiten alabeos. Madera con un valor de A entre 1,6 y 1,9, se considera normal. Maderas con un valor mayor a 2,0, la elimina para varias utilidades. Ejemplo: quebracho blanco (2,0), casuarina (3,14) y *Eucalyptus camaldulensis* (2,03).

Determinación del Punto de Saturación de las Fibras (PSF)

El PSF es la humedad que tiene una madera cuando sus células están en equilibrio con una atmósfera saturada de vapor (humedad relativa aproximada a 100 %). O sea, el PSF es el contenido de humedad en la madera cuando la presión de vapor (P_{pv}) en la pared celular, es igual a la presión de vapor saturado (P_0) en la pared celular.

El punto de saturación de las fibras es el punto donde las microfibrillas de la pared celular están saturadas y son incapaces de absorber más vapor de agua (humedad), toda agua que circula en la madera pasado este punto, lo hace por leyes de la física capilar y se denomina agua libre o capilar.

Según Coronel: "En la práctica, la determinación del *PSF* se efectúa relacionando el valor del hinchamiento o contracción máxima con el coeficiente de retractabilidad correspondiente. Se calcula con el auxilio de las siguientes fórmulas:"

$$f_x \quad \mu_{PSF} = \frac{\beta_{long}}{q_{long}} ; \mu_{PSF} = \frac{\beta_{tg}}{q_{tg}} ; \mu_{PSF} = \frac{\beta_{rd}}{q_{rd}} ; \mu_{PSF} = \frac{\beta_{vol}}{q_{vol}}$$

Donde

μ_{PSF} : Humedad correspondiente al punto de saturación de las fibras [%].

β_{long} ; β_{tg} ; β_{rd} ; β_{vol} = Contracción dimensional total longitudinal, tangencial, radial y volumétrica máxima [%].

q_{long} ; q_{tg} ; q_{rd} ; q_{vol} = Coeficiente de retractabilidad en sentido longitudinal, tangencial, radial y volumétrico.

Efecto de la contracción en la calidad de la madera

La pérdida de humedad en la madera por debajo del *PSF* puede generar defectos y deformaciones que afecten la calidad de la madera. En los procesos de secado artificial donde se fuerza la pérdida de agua hasta contenidos de humedad previamente establecidos, es posible que se generen deformaciones o defectos en la madera. En ese caso, no todas las deformaciones se producen necesariamente por efecto de un secado poco adecuado, sino que también influye la manera de encastillar, la presencia de fibra desviada, la madera de reacción, la posición de esta madera en el fuste, el sistema de corte, la posición de los anillos de crecimiento respecto del eje central, etc. (Juacida e Inzunza, 1990, citados por Pan et al. 2009).

La madera de reacción (tracción en latifoliadas y compresión en coníferas) y la madera juvenil (de densidad anormalmente baja) son propensas a excesivas contracciones longitudinales y a deformaciones o alabeos.

Las grietas en la madera son fallas mecánicas (rupturas) en la dirección longitudinal del grano. Se pueden clasificar como grietas superficiales, que se presentan en las caras y cantos de las tablas, y grietas por extremos. Las grietas en los extremos y en la superficie se originan generalmente, durante las primeras etapas del proceso de secado, cuando la zona exterior de la madera está en estado de tracción y la zona interior en compresión. Las grietas internas, se generan en las etapas intermedias o finales del proceso, cuando la zona superficial de la

madera está en estado de compresión y el interior en tracción. El agrietamiento se puede prevenir o minimizar, llevando a cabo procesos de secado de acuerdo a programas adecuados para cada especie.

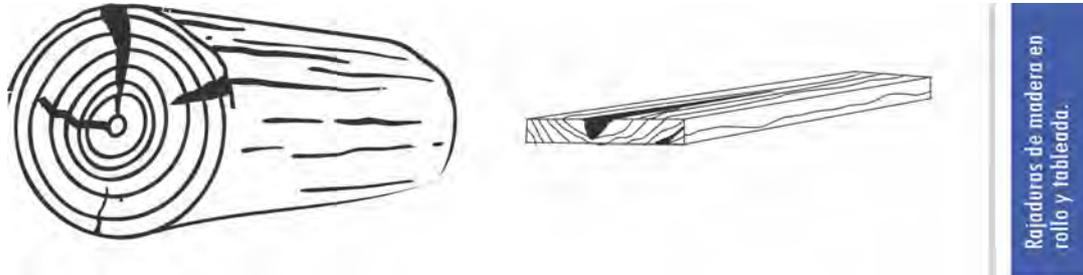


Figura 37. Rajaduras de madera en rollo y tableada.

| Tabla 16. Tipos de deformaciones o alabeos en la madera debido a la contracción. | | |
|--|---|--|
| Abarquillado | La cara de la pieza de madera se vuelve cóncava o convexa en sentido perpendicular a la fibra. Generalmente se produce en la madera de corte tangencial. Como una tendencia natural aparece en las primeras etapas del secado. Su principal causa está en la diferencia de contracción radial y tangencial. | |
| Combado de cara | La pieza de madera desarrolla una curvatura tal que la superficie o cara llega a ser cóncava o convexa a lo largo del grano. La causa se debe a contracciones desiguales en el sentido longitudinal. Sucede con mayor frecuencia en piezas de corte tangencial. | |
| Combado de canto | La pieza de madera desarrolla una curvatura tal que sus cantos llegan a ser cóncavos o convexos. Generalmente ocurre en maderas de corte radial, debido a diferencias de contracción entre los espesores cercanos a la médula y a la corteza. | |
| Revirado | Es una deformación helicoidal en la dirección longitudinal y transversal de las fibras. Se produce en madera con grano espiralado o entrelazado, siendo ésta la causa de una contracción desigual que provoca la distorsión de la pieza. Este defecto aparece también en el aserrado de la madera cuando la fibra no va paralela al eje central. Esta deformación se puede revertir con métodos de sobrepeso y utilización de prensas, tornillos y cilindros hidráulicos | |
| Fuente: Salinas (1998). | | |

Determinación de las contracciones totales y del punto de saturación de las fibras.

La Norma IRAM 9543 y la Norma DIN 52184 establecen el procedimiento para determinar los valores de hinchamiento, contracción y coeficiente de retractabilidad en los sentidos longitudinal, radial y tangencial, e incluido el contenido de humedad del punto de saturación de las fibras.

Aparatos e instrumental

- Balanza de precisión de 0,01 gr.
- Tornillos micrométricos de 0-25 mm y 50-75 mm con precisión de 0,01 mm.
- Estufa eléctrica, que opera a una temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Desecador con cloruro de calcio.
- Recipientes aptos para inmersión de probetas en agua.



Balanza analítica



Tornillos micrométricos



Estufa



Desecador

Figura 38. Aparatos e instrumental para determinación de contracción e hinchamiento. Imágenes: Maximiliano Umlandt.

Cálculos y fórmulas

A continuación se muestran las fórmulas para la determinación de los valores de contracción (β), coeficiente de retractabilidad (q) y PSF . Los subíndices 1, 2 y 3 indican el momento del ensayo en el cual son tomados los valores de cada muestra.

$$\beta_{tg} = \frac{l_{tg3} - l_{tg2}}{l_{tg3}} \cdot 100 = [\%] \quad y \quad q_{tg} = \frac{\frac{l_{tg1} - l_{tg2}}{l_{tg1}} \cdot 100}{\frac{P_1 - P_2}{P_2} \cdot 100}$$

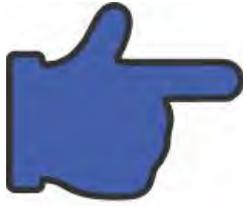
$$\beta_{rd} = \frac{l_{rd3} - l_{rd2}}{l_{rd3}} \cdot 100 = [\%] \quad y \quad q_{rd} = \frac{\frac{l_{rd1} - l_{rd2}}{l_{rd1}} \cdot 100}{\frac{P_1 - P_2}{P_2} \cdot 100}$$

$$\beta_{long} = \frac{l_{long3} - l_{long2}}{l_{long3}} \cdot 100 = [\%] \quad y \quad q_{long} = \frac{\frac{l_{long1} - l_{long2}}{l_{long1}} \cdot 100}{\frac{P_1 - P_2}{P_2} \cdot 100}$$

$$PSF_{tg} = \frac{\beta_{tg}}{q_{tg}} = [\%]; \quad PSF_{rd} = \frac{\beta_{rd}}{q_{rd}} = [\%] \quad y \quad PSF_{long} = \frac{\beta_{long}}{q_{long}} = [\%]$$

En la tabla 17 se muestra un ejemplo de planilla que se puede utilizar para el registro de hinchamiento y contracción lineal y volumétrica, coeficiente de retractabilidad y PSF .

Ejercicios de aplicación: contracción e hinchamiento



Ejercicio 18: Un cubo de pino de alepo de $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ será secado desde el PSF hasta el 0% de humedad ¿Cuál será el volumen del cubo después de secado?

Datos: β_{vmax} del pino de alepo es $10,85\%$

Resolución: Para resolver este ejercicio consideramos la fórmula de contracción volumétrica máxima

$$\beta_{vmax} = \frac{V_{\mu} - V_0}{V_{\mu}} \cdot 100 (\%)$$

Trabajamos en unidades, así que nuestro valor de dato $\beta_{vmax} = 10,85\%$ lo dividimos por 100 y pasa a ser $0,1085$. De la fórmula anterior despejamos V_0 :

$$1 - \beta_{vmax} = \frac{V_0}{V_{\mu}} \Rightarrow (1 - \beta_{vmax})V_{\mu} = V_0$$

Reemplazando se obtiene:

$$(1 - 0,1085)1000\text{cm}^3 = V_0$$

$$891,5\text{cm}^3 = V_0$$



Ejercicio 19: Determinar la contracción que experimentará un tablón de madera de corte tangencial de pehuén (*Araucaria araucana*) de $70\text{ mm} \times 190\text{ mm}$ ($3'' \times 8''$) al secar desde el estado verde hasta un 8% de humedad. Datos: $\beta_{tgmax} = 8,3\%$; $\beta_{rdmax} = 4,6\%$.

Resolución: Primero hay que encontrar la contracción normal que se produce hasta el 8% de humedad, que se calcula con la siguiente fórmula:

$$\beta_v = \beta_{vmax} \left(1 - \frac{u}{28}\right) \%$$

La fórmula es válida solamente en el rango del 0% al 28% de humedad.

$$\beta_{tg\ 8\%} = 8,3 \left(1 - \frac{8}{28}\right) = 5,9\%$$

$$\beta_{rd\ 8\%} = 4,6 \left(1 - \frac{8}{28}\right) = 3,3\%$$



Con estos datos se calculan las dimensiones al 8 %, recordando que en una tabla de corte tangencial la dirección tangente está dada por el ancho y la radial por el espesor:

$$Le_{8\%} = 70 \left(1 - \frac{3,3}{100}\right) = 67,7 \text{ mm}$$

$$La_{8\%} = 190 \left(1 - \frac{5,9}{100}\right) = 178,8 \text{ mm}$$

Al secar hasta un 8 % de humedad el tablón, se habrá contraído 2,3 mm en su espesor y 11,2 mm en su ancho.



Ejercicio 20: Una tabla de algarrobo negro tiene 10 cm de ancho en el sentido tangencial y se secará del 14 % al 6 % de humedad. ¿Cuál será la magnitud de su dimensión en el nuevo estado? sabiendo que su coeficiente de retractabilidad en sentido tangencial es $q_{tg} = 0,21$.

Resolución: A partir de la ecuación del coeficiente de retractilidad (coeficiente de contracción diferencial), se despejan los términos necesarios:



$$q_{tg} = \frac{\Delta\beta}{\Delta\mu} = \frac{\frac{l_{12} - l_0}{l_{12}}}{\frac{P_{12} - P_0}{P_0}} = \frac{(l_{12} - l_0)P_0}{(P_{12} - P_0)l_{12}} \Rightarrow \Delta\mu \cdot q_{tg} = \Delta\beta$$

$$\mu = 14 - 0 = 14 \%$$

$$14 \% \cdot 0,21 = 2,94 \%$$

Determinando la dimensión de la tabla al 0 % = x

$$1 \cdot x + 0,0294 \cdot x = 10; x(1 + 0,0294) = 10 \Rightarrow x = \frac{10}{1 + 0,0294} = 9,71 \text{ cm}$$

Con el valor encontrado se calcula la dimensión de la tabla al 6 % de humedad

$$\mu = 0 \% - 6 \% = 6 \%$$

$$6 \% \cdot 0,21 = 1,26 \%; \frac{9,71 \text{ cm} \cdot 1,26 \%}{100} = 0,122 \text{ cm}$$

La dimensión de la tabla al 6 % de humedad será

$$9,71 \text{ cm} + 0,12 \text{ cm} = 9,83 \text{ cm}$$



Ejercicio 21: Una tabla de *quebracho blanco* tiene 10 cm de ancho en el sentido tangencial y se secará del 15 % al 7 % de humedad. ¿Cuál será la magnitud de su dimensión en el nuevo estado, sabiendo que su coeficiente de retractabilidad en el sentido tangencial es $q_{tg} = 0,32$?

Resolución: El inicio de resolución es similar al ejercicio anterior.

$$\Delta\mu \cdot q_{tg} = \Delta\beta$$

$$\mu = 15 - 0 = 15 \%$$

$$15 \cdot 0,32 = 4,8\%$$

Determinando la dimensión de la tabla al 0 % = x

$$1 \cdot x + 0,048 \cdot x = 10 \text{ cm}; x(1 + 0,048) = 10 \Rightarrow x = \frac{10 \text{ cm}}{1 + 0,048} = 9,54 \text{ cm}$$

Con el valor encontrado se calcula la dimensión de la tabla al 7% de humedad

$$\mu = 0 - 7 = 7 \%$$

$$7\% \cdot 0,32 = 2,24 \%; \frac{9,54 \text{ cm} \cdot 2,24}{100} = 0,21 \text{ cm}$$

La dimensión de la tabla al 7% de humedad será

$$9,54 \text{ cm} + 0,21 \text{ cm} = 9,75 \text{ cm}$$



**PROPIEDADES TÉRMICAS, ELÉCTRICAS
Y ACÚSTICAS DE LA MADERA**

PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA MADERA

Estas propiedades hacen referencia a los efectos generados por la acción del calor o la temperatura sobre la madera y que pueden ocasionar alteraciones o modificaciones en la estructura, forma y dimensiones de las piezas de madera. Nos interesa entender e identificar estas alteraciones puesto que pueden afectar de manera notable las condiciones necesarias de la madera para su industrialización, o afectar la calidad de sus productos madereros en uso.

Las propiedades térmicas de la madera permiten conocer los efectos que el calor y la temperatura producen en este material en el rango de temperaturas normales de trabajo, sin generar alteraciones en la estructura interna de la pared celular. (Coronel y Pan,1994).



Los objetivos son conocer los efectos que la temperatura y el calor provocan en la madera en el marco de determinadas magnitudes térmicas, que no ocasionan alteraciones en la estructura interna de la pared celular, manteniendo las características de madera "sólida o maciza". En este sentido, recordemos que:

- Temperatura: es una propiedad termodinámica que determina si el sistema se encuentra en equilibrio térmico con otros sistemas. Es una medida de la energía.
- Calor: es una forma de energía.

Tabla 18. Comportamiento de la madera según rangos de temperaturas.

| | | |
|--|-------------------------------|---|
| Propiedades térmicas de la madera | Temperaturas menores a 55 °C | Estructura de la madera sin alteraciones (madera sólida). |
| | Temperaturas mayores a 100 °C | Estructura de la pared celular con modificaciones significativas. |

Para Stam (1956) las temperaturas normales de trabajo de la madera oscilan entre $- 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+ 55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El abordaje de las propiedades térmicas de la madera se realizará conforme a la clasificación y descripción que se realiza a continuación en la tabla 19.

Tabla 19. Clasificación de las propiedades térmicas de la madera.

| | | |
|--|--------------------|--|
| Propiedades térmicas de la madera | Dilatación | Es el aumento de las dimensiones de una sustancia o material por efecto del aumento en su temperatura. |
| | Capacidad térmica | Es la cantidad de calor que necesita una masa para aumentar su temperatura. |
| | Termoconductividad | Se refiere al comportamiento de un material como elemento conductor del calor. |

Dilatación

Es el proceso físico mediante el cual se produce un aumento de las dimensiones de una sustancia o material por efecto del aumento de su temperatura. Cuando aumenta la temperatura de un cuerpo sin modificar su estado físico, en general, aumentan sus dimensiones y en consecuencia su volumen.

Para el caso de la madera, en la práctica la "dilatación" tiene baja aplicación, pues su efecto es muy pequeño. La dilatación en la madera comienza a considerarse en piezas de grandes dimensiones (muy largas), en construcciones de obras civiles como puentes y en aquellos lugares donde la amplitud térmica es alta.

Coefficiente de dilatación

Se denomina coeficiente de dilatación (lineal, superficial o cúbica) al incremento de las unidades de longitud, superficie o volumen, por cada grado centígrado que se eleve la temperatura. La determinación de la dilatación de las maderas se realiza mediante la siguiente ecuación:

f_x

$$L_t = L_0 [1 + \alpha c(t - t_0)]$$

Donde

L_t : Longitud final después del aumento de temperatura.

L_0 : Longitud inicial.

αc : Coeficiente de dilatación lineal.

t : Temperatura final.

t_0 : Temperatura inicial.

A continuación, en la tabla 20, se muestran los coeficientes de dilatación lineal de algunos materiales para temperatura normal (Hütte,1965).

| Tabla 20. Coeficientes de dilatación lineal de algunos materiales para temperatura normal. | | |
|--|----------------------|-----------------------------|
| Materiales | | c-(1/°C) |
| Aluminio | | 2,38 .10 ⁻⁵ |
| Cobre | | 1,70 .10 ⁻⁵ |
| Hierro | | 1,23 .10 ⁻⁵ |
| Plomo | | 2,92 .10 ⁻⁵ |
| Vidrio común | | 8,10 .10 ⁻⁶ |
| Madera de conífera | Sentido longitudinal | 3,2 a 4,3 .10 ⁻⁶ |
| | Sentido radial | 22 a 28 .10 ⁻⁶ |
| | Sentido tangencial | 32 a 43 .10 ⁻⁶ |
| Madera de Latifoliada | Sentido longitudinal | 2,9 a 3,8 .10 ⁻⁶ |
| | Sentido radial | 23 a 31 .10 ⁻⁶ |
| | Sentido tangencial | 30 a 38 .10 ⁻⁶ |
| Fuente: Hütte (1965). | | |

La dilatación térmica aumenta proporcionalmente con la elevación de la temperatura.

La dilatación de la madera se contrarresta con la contracción debida a la pérdida humedad al secarse la madera.



El coeficiente de dilatación lineal para madera seca en la dirección paralela a las fibras es independiente del peso específico aparente y varía entre 3×10^{-6} a 5×10^{-6} por cada grado Celsius.

El aumento del coeficiente de dilatación lineal en sentido radial y tangencial de las fibras, es directamente proporcional al aumento del peso específico aparente de la madera

Coeficiente de dilatación para coníferas y latifoliadas

Para coníferas y latifoliadas livianas:

$$\alpha c_{rd} = 56 \times r_0 \times 10^{-6} \text{ (coeficiente de dilatación lineal radial)}$$

$$\alpha c_{tg} = 81 \times r_0 \times 10^{-6} \text{ (coeficiente de dilatación lineal tangencial)}$$

Para latifoliadas pesadas

$$\alpha c_{rd} = 45 \times r_0 \times 10^{-6} \text{ (coeficiente de dilatación lineal radial)}$$

$$\alpha c_{tg} = 58 \times r_0 \times 10^{-6} \text{ (coeficiente de dilatación lineal tangencial)}$$

Capacidad térmica y calor específico

La capacidad térmica está determinada por la cantidad de calor (*cal* o *kcal*) que se requiere para producir la elevación en la temperatura de la madera.

f_x

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$
$$Q = m \cdot c (t_f - t_i)$$

Donde

Q : Calor [*cal* o *kcal*].

m : Masa [*g* o *kg*].

c : Calor específico [$\frac{cal}{g} \cdot ^\circ C$ o $\frac{kcal}{kg} \cdot ^\circ C$].

Δt : Cambio de temperatura [$^\circ C$].

t_f : Temperatura final [$^\circ C$].

t_i : Temperatura inicial [$^\circ C$].

Calor específico

Es la cantidad de calor (en *cal* o *kcal*) necesarios para elevar en $1^\circ C$ la masa de 1 g o 1 kg de una sustancia.

f_x

$$C = \frac{Q}{m \cdot \Delta t}$$

Donde

C : Calor específico $\left[\frac{\text{cal}}{\text{g}} \cdot ^\circ\text{C} \text{ o } \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}\right]$.

Q : Calor [cal o kcal].

m : Masa [g o kg].

Δt : Cambio de temperatura [$^\circ\text{C}$].

t_f : Temperatura final [$^\circ\text{C}$].

t_i : Temperatura inicial [$^\circ\text{C}$].

En la tabla 21 se presentan los valores medios de calor específico de algunos materiales (Noack, 1964; Hütte, 1965).

| Tabla 21. Valores medios de calor específico de algunos materiales. | |
|---|---|
| Agua | 1,0 (de 14,5 $^\circ\text{C}$ a 15,5 $^\circ\text{C}$) |
| Alcohol | 0,6 (de 14,5 $^\circ\text{C}$ a 15,5 $^\circ\text{C}$) |
| Aluminio | 0,226 (de 14,5 $^\circ\text{C}$ a 15,5 $^\circ\text{C}$) |
| Cobre | 0,094 (de 14,5 $^\circ\text{C}$ a 15,5 $^\circ\text{C}$) |
| Hierro | 0,115 (de 14,5 $^\circ\text{C}$ a 15,5 $^\circ\text{C}$) |
| Plomo | 0,035 (de 14,5 $^\circ\text{C}$ a 15,5 $^\circ\text{C}$) |
| Vidrio | 0,2 (de 14,5 $^\circ\text{C}$ a 15,5 $^\circ\text{C}$) |
| Hormigón, ladrillo, piedra | 1,18 – 0,20 |
| Aire | 0,24 (a 0 $^\circ\text{C}$) |
| Madera | 0,324 |
| Fuente: Noack (1964), Hütte (1965). | |

El calor específico de la madera en estado anhidro es $0,324 \frac{\text{cal}}{\text{g}} \cdot ^\circ\text{C}$ o $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}$ y depende de:

- ✓ Tipo de madera.
- ✓ Peso específico.
- ✓ La temperatura.
- ✓ La humedad.
- ✓ Porcentaje de extractivos.

La relación entre el calor específico y la temperatura está dada por las siguientes expresiones matemáticas:

$$c = 0,266 + 0,00116t$$

Donde

c : Calor específico $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}\right]$.

t : Temperatura $[^\circ\text{C}]$.

Para obtener un valor medio de calor específico en un entorno de validez de la ecuación (t entre 0°C y 100°C):

$$C_m = \frac{1}{100} \int_0^{100} (0,266 + 0,00116 \cdot t) \cdot dt$$

$$C_m = \frac{1}{100} \int_0^{100} \left(\frac{0,266+0,00116t^2}{2}\right) = 0,324 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \cdot ^\circ\text{C}$$

Donde:

C_m : Calor específico medio $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}\right]$.

t : Temperatura $[^\circ\text{C}]$.

La relación entre el calor específico y la humedad de la madera está dada por las siguientes expresiones matemáticas:

f_x

$$C_x = X \cdot C_a + C_0(1 - X) = X + C_0(1 - X)$$

Donde:

C_x : Calor específico a X contenido de humedad $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}\right]$.

C_a : Calor específico del agua = $1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}$.

C_0 : Calor específico de la madera completamente seca $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}\right]$.

X : Grado de humedad referido al peso húmedo.

Para que la relación matemática anterior sea aplicable a la madera es necesario sustituir la humedad referida al peso húmedo "X" por la humedad referida al peso seco " μ ".

f_X

$$C_{\mu} = \frac{\mu + C_0}{1 + \mu} = \frac{0,324 + \mu}{1 + \mu}$$

Donde:

C_{μ} : Calor específico a μ contenido de humedad $\left[\frac{kcal}{kg} \cdot ^\circ C\right]$.

C_0 : Calor específico de la madera completamente seca $\left[\frac{kcal}{kg} \cdot ^\circ C\right]$.

μ : Grado de humedad referido al peso seco.

En la tabla 22 se muestran valores de calor específico medio para distintos contenidos de humedad de una madera (Coronel, 1994).

| Tabla 22. Calor específico medio para distintos contenidos de humedad de una madera. | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| μ (%) | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| $C_{\mu} \left(\frac{kcal}{kg} \cdot ^\circ C\right)$ | 0,324 | 0,430 | 0,520 | 0,570 | 0,620 | 0,660 |
| Fuente: Coronel (1994). | | | | | | |

Poder calorífico de la madera

Coronel (1994) explica el poder calorífico de la madera como el calor desprendido por kg de combustible en combustión completa a presión y temperatura atmosférica normal. Es una característica termoquímica y se determina mediante la combustión de la madera

El poder calorífico de la madera anhidra y sin cenizas es prácticamente constante, pues su composición elemental casi no varía entre especies: $C = 50\%$; $H = 6,5\%$; $O = 43\%$, adoptándose como valor medio $4500 kcal/kg$.

Los factores que influyen en el poder calorífico de la madera son:

- ✓ Contenido de humedad; debido al punto de rocío de los gases.
- ✓ Porcentaje de lignina: especies con mayor contenido de lignina como las coníferas, tendrán mayor poder calorífico.

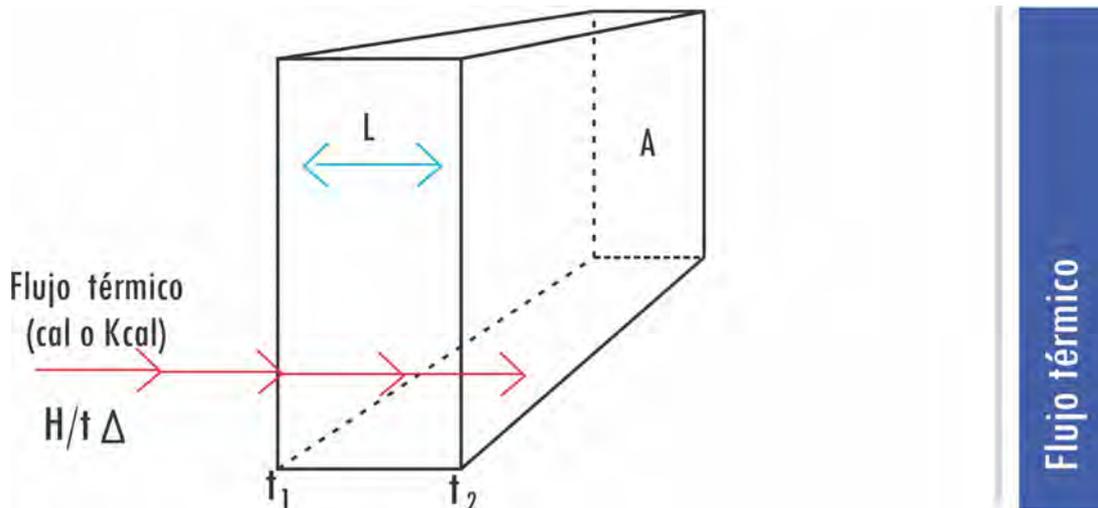
Coeficiente de difusibilidad térmica

El coeficiente de difusibilidad térmica (a) es un factor que indica la velocidad con la que se eleva la temperatura de un material que esté en contacto con un cuerpo más caliente.

$$a = \frac{\text{Coeficiente de conductividad calorífica o térmica (X)}}{\text{Calor Específico (C)} \cdot \text{Peso Específico Aparente (r)}}$$

Conductividad calorífica o térmica de la madera

La conductividad térmica es una propiedad física que indica la mayor o menor facilidad con que una sustancia determinada realiza la transmisión del flujo (termoconductividad).



El flujo térmico en régimen permanente obedece a la Ley de Fourier:

$$\lambda = \frac{\text{Flujo térmico}}{\text{Gradiente de temperatura}}$$
$$\lambda = \frac{H \cdot L}{T \cdot A \cdot \Delta t}$$

Donde

λ : Coeficiente de conductividad calorífica interna.

H : Cantidad de calor en *kcal*.

A : Sección de la cara caliente y fría.

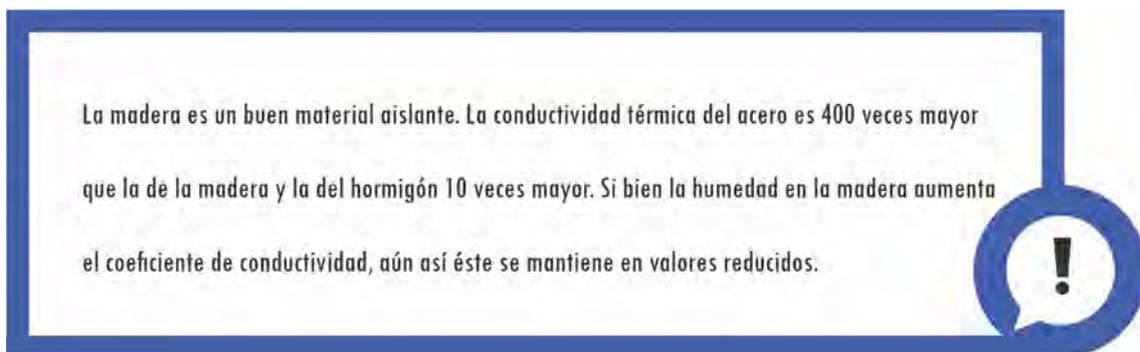
t_1 : Temperatura de la cara caliente.

t_2 : Temperatura de la cara fría.

L : Distancia entre cara caliente y cara fría.

T : Tiempo de pasaje de la energía térmica.

El coeficiente de conductividad calorífica interna (λ), se define técnicamente como aquella cantidad de calor en *kcal* que atraviesa por hora, en estado de equilibrio, un cubo de un (1) metro de arista, desde una de sus caras a la opuesta, cuando entre éstas existe una diferencia de temperatura de 1°C .



A continuación, en la tabla 23, se presentan coeficientes de conductividad calorífica interna de algunos materiales y medios (Hütte, 1965; Norma IRAM 11601, 1988).

| Tabla 23. Coeficientes de conductividad calorífica interna de algunos materiales y medios. | |
|--|---|
| Medio o material | Conductividad calorífica λ (Kcal/m.h.°C) |
| Vacío | 0,00 |
| Aire | 0,0216 |
| Placa aislante (telgopor) | 0,035 |
| Placa aislante (fibra de vidrio) | 0,035 |

| | |
|---|-------------|
| Panel aglomerado | 0,07 – 0,12 |
| Madera (en dirección longitudinal a las fibras) | 0,35 |
| Madera (en dirección transversal a las fibras) | 0,10 – 0,15 |
| Ladrillo común | 0,40 |
| Ladrillo refractario | 1,04 |
| Vidrio de ventana | 1,00 |
| Agua | 0,50 |
| Piedra de construcción | 1,60 |
| Hormigón | 1,30 |
| Aluminio | 180 |
| Hierro | 50 |
| Cobre | 330 |
| Fuente: Hütte (1965), Norma IRAM 11601 (1988). | |

El coeficiente de conductividad calorífica interna depende de:

- ✓ Peso específico.
- ✓ Dirección de las fibras.
- ✓ Porcentaje de humedad.
- ✓ Temperatura.

La relación entre el coeficiente de conductividad calorífica interna y el peso específico de la madera está descrita por la siguiente ecuación:

$$f_x \quad \lambda = 0,168 r_\mu + 0,022 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

Donde

λ : Coeficiente de conductividad calorífica interna.

r_μ : Peso específico aparente a un contenido de humedad " μ ".

La determinación del coeficiente de conductibilidad calorífica interna en función del peso específico y humedad de la madera, se lleva a cabo con la siguiente ecuación, la cual es válida hasta un 40 % de humedad:

$$\lambda = R_{\mu}(0,172 + 0,0034 \mu) + 0,025$$

Donde

λ : Coeficiente de conductividad calorífica interna.

R_{μ} : Peso volumétrico húmedo.

μ : Humedad.

La determinación de la conductividad calorífica interna en función de la temperatura se realiza con la siguiente fórmula, la cual es válida en el intervalo de temperatura de $-50^{\circ}\text{C} < t < +100^{\circ}\text{C}$:

f_{λ}

$$\lambda_2 = \lambda_1 \left[1 - (1,1 - 0,98r_0) \left(\frac{t_1 - t_2}{100} \right) \right]$$

Donde

λ_1 : Coeficiente de conductividad calorífica inicial, a la temperatura t_1 .

λ_2 : Coeficiente de conductividad calorífica después del aumento de la temperatura, de t_1 a t_2 .

r_0 : Peso específico aparente anhidro de la madera.

t_1 : Temperatura inicial.

t_2 : Temperatura final.

En los materiales corrientes aislantes y de construcción, la influencia de la temperatura en el coeficiente de conductibilidad calorífica es siempre positiva y crece con el volumen de los poros y con el tamaño medio de éstos. Dicha ley se aplica a las maderas y productos derivados de ella.

Resistencia al fuego

La resistencia al fuego por parte de la madera no es una propiedad física, no obstante, por las aplicaciones de la madera en la construcción, su resistencia al fuego es una característica asociada al desempeño del material y su aptitud para aplicaciones como elementos estructurales y no estructurales, en la construcción con madera.

Cuando se expone la madera a las llamas se torna combustible y se propaga el fuego. Transcurrido un breve periodo de tiempo se observa que las capas exteriores de la madera se carbonizan, cumpliendo una función aislante y de protección para las capas interiores de la misma. Entre la capa carbonizada y la sana se encuentra una capa de transición, que por estar parcialmente afectada no desarrolla íntegramente su capacidad mecánica (García, 2021).

Etapas en la combustión de la madera

- Sin el contacto directo con la llama la madera produce fuego a temperaturas en superficie superiores a los 400°C . Con exposición directa esa temperatura puede ser del orden de los 300°C .
- El tiempo de exposición puede ocasionar que la madera se encienda para temperaturas más bajas. Entre 150°C y 200°C se generan gases combustibles, lo cual hace que se encienda y aumente la temperatura continuando el proceso.
- Aproximadamente a 500°C se reduce fuertemente la producción de gases y aumenta la porción carbonizada, que tiene una conductividad térmica muy baja (alrededor de $1/6$ de la de la madera normal).
- Origina un retardo de la descomposición de las capas sanas, que ocurre en la zona intermedia de transición y explica la razón por la cual el interior de las piezas puede estar en condiciones normales luego de un incendio, resistiendo esfuerzos en mejores condiciones que otros materiales.
- La velocidad de carbonización es de $0.6/0.7 \text{ mm/minuto}$ sin importar la especie.

A continuación, en la figura 39, se observa la sección de una viga multilaminada con sus capas externas carbonizadas por acción del fuego (García, 2021).



Figura 39. Viga multilaminada con capas externas carbonizadas. Fuente: García (2021).

En la figura 40 se presenta la pérdida de resistencia comparativa entre la madera y el acero (Edsberg, 2021).

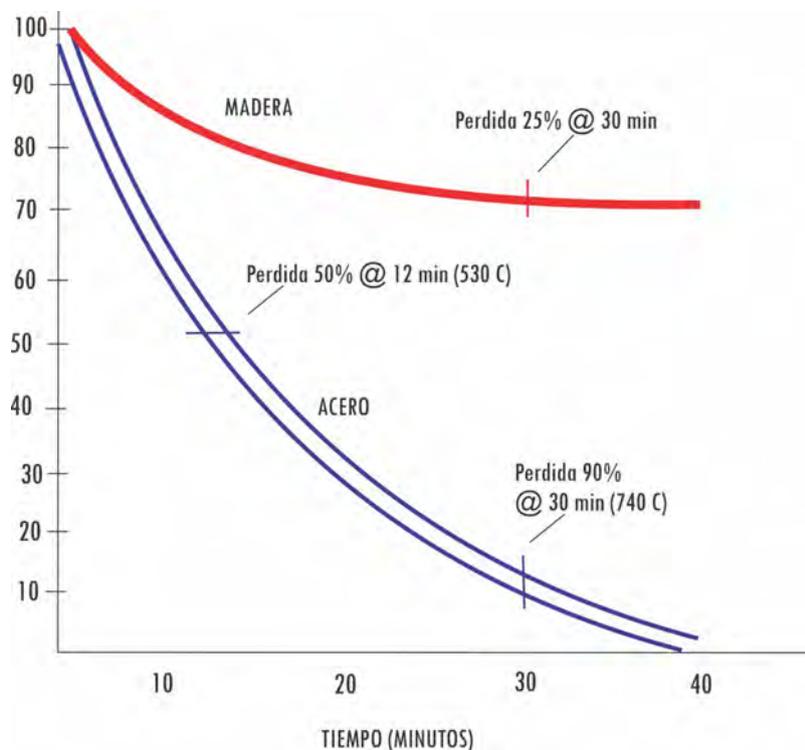


Figura 40. Pérdida de resistencia comparativa entre la madera y el acero. Fuente: Edsberg (2021).

En la figura 40 se puede observar que a los 30 minutos de exposición a más de 600°C de temperatura, el acero pierde más del 70 % de su capacidad resistente y la madera pierde un 30 % aproximadamente.

La madera se ve afectada en las capas exteriores que quedan expuestas al fuego (carbonización). Para mejorar su respuesta a estos efectos y aumentar la seguridad, se pueden diseñar elementos levemente mayores (mayor escuadría o sección transversal) y así aumentar la capacidad resistente de la madera al momento de enfrentarse a las llamas.

La madera aumenta su módulo de elasticidad (su rigidez) conforme pierde humedad, a razón de un 3 % por cada 1 % de humedad que pierde. En un incendio el efecto del calor promueve la eliminación de humedad de la madera. Si la madera de la estructura está estabilizada en 12 %, en los primeros momentos del incendio la madera puede aumentar su capacidad de carga en más del 30 % (Edsberg, 2021).

PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LA MADERA

Las propiedades eléctricas de la madera son aquellas propiedades físicas que estudian la relación "madera – electricidad" y los efectos que la acción de la corriente eléctrica produce en este material, utilizando por un lado la madera como un elemento pasivo de un circuito eléctrico, mediante la resistividad o conductividad que al paso de la corriente ofrece un receptor, y, por otro lado, el comportamiento de la madera como dieléctrico al ser sometida la acción de un campo eléctrico.

La madera absolutamente seca es un muy buen aislante, pero la madera secada al aire, ósea aproximadamente con un 15% de humedad, puede considerarse semiconductor, debido a que su poder aislante resulta muy disminuido por la aparición de las corrientes parasitas de fuga en la superficie (Coronel, 1994)..



Entre los objetivos de las propiedades eléctricas de la madera están conocer los efectos que la electricidad provoca en la madera, las ventajas de su utilización como material aislante cuando se presenta en estado absolutamente seco, y las desventajas como material conductor cuando el porcentaje de humedad se encuentra por arriba del punto de saturación de las fibras (*PSF*).

En la tabla 23 se presenta una clasificación de las propiedades eléctricas de la madera.

Tabla 23. Clasificación de las propiedades eléctricas de la madera.

| | | |
|--|-----------------------|---|
| Propiedades eléctricas de la madera | Resistividad | Dificultad con que se mueve la onda eléctrica al atravesar la madera. |
| | Conductividad | Facilidad con que fluye la onda eléctrica al atravesar la madera. |
| | Capacidad dieléctrica | Mide la capacidad aislante de un material. La condición de un cuerpo de dieléctrico lleva aparejada su condición de aislante, aunque no sean términos equivalentes. |

Resistencia eléctrica de la madera

f_x

$$R = q \cdot \frac{l}{A}$$

Donde

R : Resistencia eléctrica [*ohmios*].

q : Resistividad eléctrica del material [*ohmios x cm*].

l : longitud del elemento resistor [*cm*].

A : Sección del elemento resistor [*cm²*].

Factores que influyen en la resistividad o conductividad de la madera:

- ✓ Humedad.
- ✓ Contenido iónico.
- ✓ Temperatura.
- ✓ Dirección de las fibras.

La influencia de la humedad en la resistividad o conductividad de la madera tiene aplicaciones prácticas en la industria maderera, pues en sus principios se basa el funcionamiento de los xilohigrómetros utilizados para determinar la humedad en la madera.

La relación matemática la proponen Stam y Nusser:

$$\log r = c - a \cdot u$$

o bien

$$r = D \cdot e^{-bu}$$

Donde

r : Resistencia específica o resistividad

D , c , a y b : Constantes

u : Humedad

Nusser, (1938), confirma los trabajos de Stamm y completa los coeficientes, expresando la siguiente relación:

$$\log r = 13,25 - 0,32 \cdot u$$

$$r = 1,78 \cdot 10^{13} \cdot e^{-0,73u}$$

Pan (2009) indica que esta relación es válida sin grandes errores en un intervalo de humedad entre 8 – 18 %.

En la figura 41 se observa un gráfico que describe la conductividad eléctrica en función de la humedad para madera de redwood (*Sequoia sempervirens* Endl), (Stamm y Kollman, 1959).

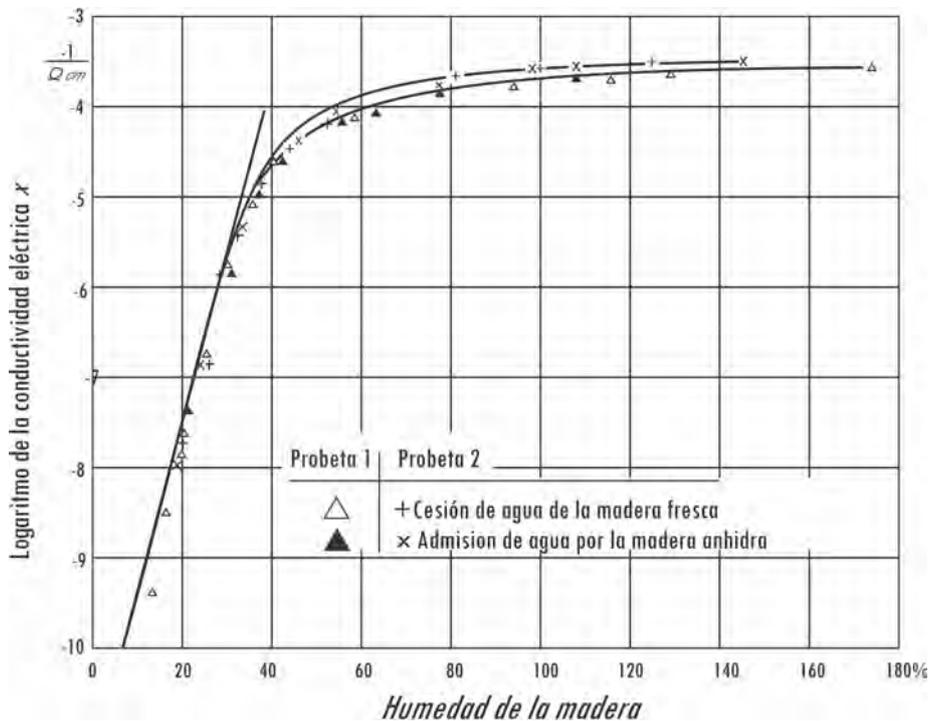


Figura 41. Conductividad eléctrica en función de la humedad para madera de redwood (*Sequoia sempervirens* Endl). Fuente: Stamm y Kollmann (1959)

Comportamiento dieléctrico de la madera

Los materiales conductores son aquellos cuyas partículas cargadas son libres de moverse en todo el material y concentran excesos de carga en la superficie del conductor.

Por su lado, los materiales aislantes o dieléctricos son aquellos cuyas partículas cargadas mantienen posiciones fijas entre sí en toda la red molecular y no concentran excesos de carga en la superficie.

Un condensador como indica la figura 42, posee la característica de tener una tensión “ E ” entre las placas y presenta una carga eléctrica o cantidad de electricidad “ Q ”.

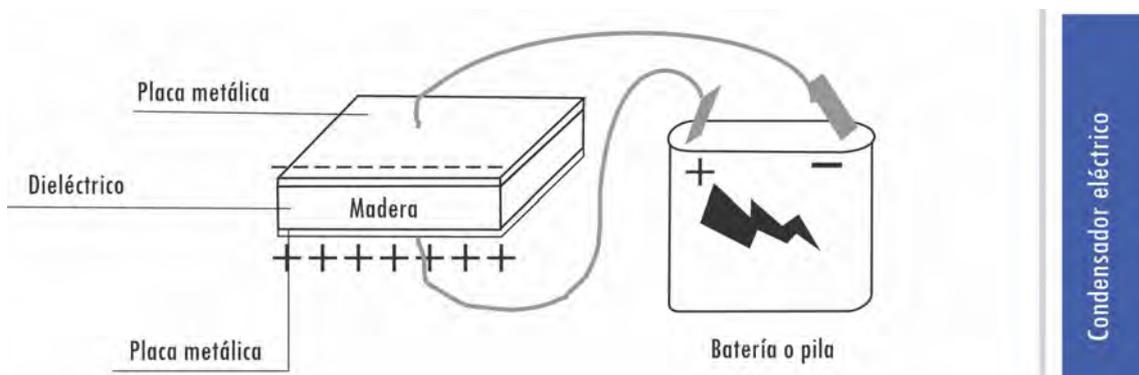


Figura 42. Figura 42. Condensador eléctrico. Fuente: IES José Arencibia Gil (2014).

La relación entre estas dos cantidades (E y Q), se denomina capacidad del condensador o capacitancia cuando el espacio entre las placas en el vacío, o sea:

$$f_x \quad C = \frac{Q}{E}$$

Donde

C : Capacidad del condensador en *Faradios*.

Q : Carga eléctrica o cantidad de electricidad, en *Culombios*.

E : Tensión de la corriente, en *Voltios*.

La capacidad del condensador será más elevado cuanto mayor sea el valor de “ Q ” por unidad de voltaje aplicado, el cual aumenta con la superficie de las placas y es inverso a la distancia de los mismos.

Si entre las placas se coloca un material como la madera (figura 42), ella influye en la relación de "Q" y "E", o sea en la capacidad del condensador.

Las moléculas de la sustancia llamado dieléctrico (madera en este caso) tiende a ordenarse en el campo eléctrico para neutralizar las cargas de las placas, mientras se produce un nuevo flujo con la finalidad de compensar la alteración ocurrida por la colocación del dieléctrico (Coronel, 1994).

La carga eléctrica en una de las placas ha aumentado en la cantidad inducida por los electrones neutralizados por el dieléctrico. Al aumentar "Q" con "E" constante, el valor de "C" se incrementa a "C_m".

La relación entre ambas capacidades es la "constante dieléctrica" de la sustancia $\epsilon = C_m/C$, la cual indica el aumento de la capacidad del condensador, en este caso para la madera, cuando la madera es colocada entre sus placas en comparación con el vacío.

En la tabla 24 se indican los valores de las constantes dieléctricas (ϵ) de algunos materiales, según Hütte (1965) y Grammel (1989).

| Tabla 24. Valores de las constantes dieléctricas (ϵ) de algunos materiales. | |
|--|--------------------------------------|
| Material | Constante dieléctrica (ϵ) |
| Vacío | 1 |
| Aire | 1,0006 |
| Parafina | 2 |
| Porcelana | 6 |
| Agua | 81 |
| Madera seca (0 %) en sentido paralelo a las fibras | 3 - 4 |
| Madera seca (0 %) en sentido transversal a las fibras | 2 - 3 |
| Fuente: Hütte (1965) y Grammel (1989). | |

Según los antecedentes de las investigaciones de diversos autores citados por Coronel (1994), los factores que influyen en la constante dieléctrica de la madera son:

- ✓ Humedad.
- ✓ Peso específico.
- ✓ Temperatura.
- ✓ Frecuencia.

El fenómeno descrito anteriormente para la madera, puede ser usado en la industria del secado y el encolado de madera, en ambas situaciones aprovechando el calentamiento con corriente de alta frecuencia.

PROPIEDADES ACÚSTICAS DE LA MADERA

Las propiedades acústicas de la madera son aquellas propiedades físicas que estudian la relación madera-sonido y los efectos que la acción del flujo acústico produce en este material, utilizando a la madera como un elemento receptor del sonido.

Debido a la naturaleza porosa de la madera, resulta ideal para ser utilizada en instrumentos musicales, pues amortigua las vibraciones sonoras absorbiendo y reduciendo el sonido.



Los objetivos del estudio de esta propiedad es conocer los principios que rigen la propagación del sonido en la madera, como así también conocer las propiedades acústicas más importantes que se buscan en la madera para su utilización como material acústico.

Las vibraciones producidas por ondas sonoras se transmiten con dificultad en relación a otros materiales. No obstante, es menos efectiva para bloquear el sonido, dado que esta capacidad depende del peso del material y la madera es más liviana que otros materiales (García, 2021).

En la tabla 25 se presentan las aplicaciones en la madera de las propiedades acústicas.

| Tabla 25. Aplicaciones en la madera de las propiedades acústicas. | | |
|---|--------------------------|-------------------------------------|
| Propiedades acústicas de la madera | Control de calidad | Velocidad de propagación del sonido |
| | Material de construcción | Acondicionamiento acústico |
| | | Aislación acústica |
| | Instrumentos musicales | Resonancia |

La velocidad de propagación del sonido se aplica en la madera con fines de evaluar la calidad de productos obtenidos a partir de ella, utilizando ultrasonido mediante métodos no destructivos:

- Detección rápida de la presencia de grietas, rajaduras, huecos y fallas internas, ataque de hongos, etc.
- Evaluación de las constantes elásticas de la madera.
- Evaluación de la densidad de la madera.
- Evaluación de las propiedades de anisotropía elástica.

Velocidad de propagación del sonido depende de los siguientes factores:

- Peso específico aparente.
- Contenido de humedad.
- Dirección de las fibras.

La velocidad de sonido se determina de acuerdo a las siguientes expresiones matemáticas:

| | |
|-------|-----------------------------|
| f_x | $c = \sqrt{\frac{S}{\rho}}$ |
|-------|-----------------------------|

Donde

c : Velocidad del sonido [cm/seg].

S : Rigidez a la deformación, o sea, la resistencia contra la deformación elástica de la materia conductora [kg/cm^2].

ρ : Densidad del medio [$kg \cdot seg^2/cm^4$].

En cuerpos sólidos y anisotrópicos como la madera, se calcula la velocidad de transmisión longitudinal " c_l " y transversal " c_t ", con la misma fórmula, pero tomando para el valor " S " el módulo de elasticidad longitudinal " E " o el módulo de elasticidad transversal " G " y reemplazando la densidad " ρ " con el valor de peso específico aparente " r ".

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{r}} \quad ; \quad c_l = \sqrt{\frac{E}{r}} \quad (\text{Kollmann, 1954})$$

Si el peso específico aparente es constante para una determinada madera, entonces se puede deducir la relación entre la velocidad del sonido paralelo a la fibra y la correspondiente al sentido transversal:

$$\frac{c_l}{c_t} = \sqrt{\frac{E_l}{E_t}} \cong 1,34 \quad (\text{Kollmann, 1954})$$

En la Tabla 26 se presentan velocidades de sonido en maderas, calculadas a partir de constantes dieléctricas.

| Tabla 26. Velocidades de sonido en maderas. | | | | | | | |
|---|---|---|--|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------|
| Maderas | Peso específico aparente medio (g/cm^3) | Densidad media ($Kg \cdot seg^2/cm^4 \cdot 10^6$) | Módulo de elasticidad promedio | | Velocidad media del sonido c | | $C_u C_l$ |
| | | | \parallel a las fibras (Kg/cm^2) | \perp a las fibras (Kg/cm^2) | \parallel a las fibras (m/seg) | \perp a las fibras (m/seg) | |
| Abeto rojo | 0,47 | 0,479 | 110000 | 5500 | 4790 | 1072 | 4,47 |

| | | | | | | | |
|--------------------------|------|-------|--------|--------|------|-------|--------|
| Pino silvestre | 0,52 | 0,530 | 120000 | 4600 | 4760 | 932 | 5,11 |
| Pinabete | 0,45 | 0,459 | 110000 | 4900 | 4890 | 1033 | 4,73 |
| Alerce | 0,63 | 0,642 | 94000 | 9150 | 3826 | 1194 | 3,21 |
| Haya | 0,73 | 0,744 | 160000 | 15000 | 4638 | 1420 | 3,27 |
| Roble albar | 0,69 | 0,703 | 130000 | 10000 | 4304 | 1193 | 3,61 |
| Tilo | 0,53 | 0,541 | 74000 | (2500) | 3700 | (680) | (5,44) |
| Fuente: Kollmann (1954). | | | | | | | |

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- COPANT. 1972. *Norma 458 Maderas, Selección y Colección de Muestras*. Comité Panamericano de Normas Técnicas.
- Coronel, E. O. 1994. *Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 1ª parte Fundamentos de las propiedades físicas de las maderas*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Santiago del Estero, Argentina. Pp 187.
- DIN. 1976. Normas N° 50.014; 52.182; 52.183; 52.184. Deutsches Institut für Normung. Berlin, Deutschland.
- DIN. 1982. Taschenbuch 31: Normen über Holz. Berlin, Deutschland.
- Fernández-Golfín Seco, J. I. y Álvarez Noves, H. 1998. *Manual del secado de maderas*. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho. Madrid, España. Pp. 169.
- García, D. 2020. *Módulo 2: Tecnología de la Madera*. Diplomatura: Uso y Construcción Eficiente con Madera. Instituto Misionero de Estudios Superiores (IMES), y Asociación de Productores, Industriales y Comerciantes Forestales de Misiones y Norte de Corrientes (APICOFOM), Misiones, Argentina. Pp. 115.
- Grammel, R. 1989. *Forstbenutzung: Technologie, Verwertung und Verwendung des Holzes*. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin. Pp. 193.
- Hoheisel, H. 1968. *Estipulaciones para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de Las Maderas*. Instituto Forestal Latinoamericano de Investigación y Capacitación. Mérida, Venezuela.
- Hütte, I. 1965. *Manual del ingeniero. Tomo 1*. Editorial Gustavo Gili S.A. Barcelona, España.
- IRAM. Normas N° 9.502; 9.532; 9.544; 9.543. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (Catálogo de Normas IRAM). Buenos Aires, Argentina.

- Junta del Acuerdo de Cartagena. 1989. *Manual del Grupo Andino para el secado de maderas*. Junta del Acuerdo de Cartagena. Lima, Perú. Pp. 125.
- Kollmann, F. 1959. *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera. Madrid, España. Pp. 675.
- Monteoliva, S. 2009. *UNIDAD 1: La madera: propiedades y productos forestales*. Curso de Xilotecología, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de la Plata, Argentina. Pp. 13.
- Monteoliva, S. 2015. *Estructura de la madera*. Notas de Clase, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de la Plata, Argentina. Pp. 5.
- Pan, E. M; Ruiz, A. P. y Ruiz, E. 2009. *Propiedades tecnológicas de la madera 1ª parte*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Editorial Lucrecia. Santiago del Estero, Argentina. Pp. 184.
- Salinas, M. 1988. *Apunte para el curso de Tecnología de la Madera (I)*. Serie de Apoyo Académico N° 33. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Siau, J. F. 1971. *Flow in the Wood*. Syracuse University Press; 1st edition. Syracuse, EEUU. Pp. 131.
- Spavento, E. M; Keil, G. D. y Monteoliva, S. 2008. *Propiedades Físicas de la Madera*. Curso de Xilotecología, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de la Plata, Argentina. Pp. 29.
- Suirezs, T. M. y Berger, G. 2009. *Descripciones de las Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera*. Editorial Universitaria de Misiones, Argentina. Pp. 56.
- Umlandt, M. 2017. *Guía de Trabajos Prácticos*. Cátedra de Fundamentos de Tecnología de la Madera, Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. Pp. 36.

Umlandt, M. 2017. *Guía de Problemas de Aplicación*. Cátedra de Fundamentos de Tecnología de la Madera, Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. Pp. 44.

Páginas web

Atencia, M. E. *Secado de la Madera*. Disponible el 17 de febrero de 2021 en https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/52839/mod_resource/content/1/ATENCIA%2C%20M.%20E%20%20Secado%20de%20madera.pdf

Atlas de histología vegetal y animal. *La célula. Ampliaciones. Pared Celular*. Disponible el 22 de noviembre de 2021 en <http://mmegias.webs.uvigo.es/5-celulas/ampliaciones/2-pared-celular.php>

IES José Arencibia Gil. 2014. *Condensadores*. Blog de Tecnología – Telde Gobierno de Canarias. Disponible el 6 de octubre de 2021 en <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fsancac/2014/03/12/condensadores/>

Textos Científicos.com. *Estructura de la Madera*. Disponible el 15 de mayo de 2020 en <http://www.textoscientificos.com/papel/estructura-madera>