



# LA MADERA COMO MATERIAL ESTRUCTURAL

## Certezas, Conjeturas, Incógnitas y Perspectivas

Hacia la conformación de una Resistencia  
de Materiales de los Cuerpos de Madera

por

Luis J. Lima  
Profesor Emérito

Lima, Luis Julián

Hacia la conformación de una resistencia de materiales de los cuerpos de madera : la madera como material estructural : certezas, conjeturas, incógnitas y perspectivas / Luis Julián Lima. - 1a ed. - Junín : Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. UNNOBA, 2018.

Memoria USB, PDF

ISBN 978-987-3724-52-7

1. Madera. 2. Resistencia de Materiales. 3. Educación Superior. I. Título.  
CDD 681.1

# Índice

Prólogo	iii
PRIMERA PARTE: Encuadre General del Tema	1
1. Características Generales de la Madera	1
1.1. Definición	1
1.2. Maderas duras y maderas blandas	3
2. Estructura Resistente Interna de la Madera	5
2.1. El árbol, origen de la madera	5
2.2. El Cambium, origen de la estructura interna de la madera	7
2.3. Constitución básica de los elementos resistentes de la madera	7
2.3.1. Microfibrillas	9
2.3.2. Fibras	10
2.4. Fundamento del comportamiento resistente de la madera	13
3. Estado de Coacción de la Madera. Sus Consecuencias Estructurales	16
4. Sobre las Aplicaciones Estructurales de la Madera	19
5. Propiedades Mecánicas de la Madera	20
5.1. Algunos Datos Básicos	20
5.2. Características salientes del trabajo estructural de la madera	24
6. Defectos de la Madera que afectan su trabajo mecánico	27
6.1. Defectos Naturales	27
6.2. Defectos debidos a la acción humana	30
7. Dispersión en los Resultados	31
7.1. Dispersión propia del cuerpo material y dispersión generada por errores de procedimiento	31
7.2. Acerca de la representatividad de las probetas	33
8. Comportamiento Reológico de la Madera	35
8.1. Retracción e hinchamiento	35
8.2. Fluencia	35
9. El empleo de la madera en la construcción de estructuras resistentes	36
9.1. Comportamiento en Servicio	36
9.2. Resistencia a Rotura	37
9.3. Durabilidad	37
SEGUNDA PARTE: Encuadre de una posible Teoría referida al Comportamiento Resistencia de los Cuerpos de Madera	39
10. Diferentes Resistencias de los Cuerpos Materiales existentes	39
TERCERA PARTE: Incógnitas y Conjeturas	41
11. Objetivos	41
12. Análisis de las posibles Hipótesis Básicas	41

CUARTA PARTE: Propuesta de un Orden de Prioridades	48
13. Determinación de las probetas a utilizar para los diferentes ensayos	48
14. Elementos con las fibras en sentido longitudinal, ensayados en tiempos cortos	48
15. Elementos con las fibras en sentido transversal ensayados en tiempos cortos	49
16. Acción del tiempo	49
Bibliografía	50
Anexo A: El concepto de “Material Compuesto” en aplicaciones Resistentes	51

## Prólogo

El Congreso sobre “Utilización de la Madera CLEM+CIMAD 2017”, organizado por la Universidad Nacional del Noroeste de Buenos Aires (UNNOBA) en mayo de 2017, ha dejado una serie de experiencias que, si se las analiza en perspectiva y se aprovechan sus enseñanzas, pueden resultar altamente positivas para coordinar los futuros planes de investigación y optimizar los resultados que se obtengan. Estas conclusiones se apoyan en las siguientes particularidades de lo ocurrido en dicho Congreso: a) el gran número de participantes y de trabajos presentados; b) el entusiasmo y la buena disposición puestos de manifiesto en la gran mayoría de los casos; c) la constatación de que muchas ponencias se ocupan exclusivamente de la obtención de determinados datos específicos –por ejemplo, la mera cuantificación de comportamientos resistentes– sin haber extraído toda la información que dichos ensayos hubiesen posibilitado. Si se considera la gran inversión económica y, principalmente, en horas-hombre de investigadores formados que la realización de estos trabajos implica, se tiene la sensación de que se ha desestimado una muy importante cantidad de datos experimentales. De todos modos no ignoramos que, en algunos casos, el presente comentario puede estar originado en la extensión limitada de los textos admitidos que no permitió exponer todo lo logrado; d) muchas veces, también, se tiene la impresión de que falta un *marco teórico global* de referencia que de sustento, unidad y sentido a muchos de los datos experimentales obtenidos; e) no siempre se determina en forma experimental la influencia de las diversas variables que se estudian, lo que estaría mostrando una deficiente planificación metodológica de las tareas; f) sería conveniente definir, al menos en el ámbito latinoamericano, qué normativa es aconsejable utilizar para encuadrar unificadamente los trabajos experimentales; g) habría que buscar, así mismo en el ámbito latinoamericano, un cierto acuerdo sobre qué tipo de probetas utilizar para ejecutar los distintos ensayos y definir las características básicas de ellas. En vista de todo lo dicho, el presente texto debe interpretarse como un intento de aporte a la construcción de un marco teórico que permita encauzar el ordenamiento citado, por lo que puede considerárselo como una propuesta, o sugerencia, de Plan de Investigación, pues las conjeturas que se presentan hay que confirmarlas o refutarlas y las incógnitas hay que dilucidarlas. El Plan de Investigación expuesto tiene como objetivo, tal cual su título lo expresa, dar fundamento experimental a la conformación de una herramienta matemática que permita prever los comportamientos estructurales de la madera y, en consecuencia, transformarse en un elemento teórico de cálculo de estructuras y de verificación de su seguridad. En otras palabras, apuntamos a incentivar y ordenar la obtención experimental de los datos necesarios para fundamentar una posible *Resistencia de Materiales Específica de los Cuerpos de Madera*.

Las consideraciones precedentes son una consecuencia directa del trabajo de relatoría<sup>1</sup> realizado por los equipos internos de investigadores del LEMEJ, a quienes expresamos acá nuestro reconocimiento por la calidad de la labor realizada. También quiero expresar aquí mi más profundo agradecimiento a Miguel Tortoriello, Ana Clara Cobas, María José Castillo y Alejandro Mateos, todos ellos investigadores del LEMEJ e integrantes de las cátedras del Área Materiales y Estructuras de la UNNOBA, por la paciencia de haber leído los sucesivos manuscritos del texto y haber efectuado sugerencias y correcciones que lo mejoraron notablemente.

Junín, febrero de 2018.

Luis J. Lima  
Profesor Emérito

---

<sup>1</sup> Cuyos resultados están a disposición de los participantes del evento citado en el LEMEJ (lemej@unnoba.edu.ar).

# PRIMERA PARTE:

## Encuadre General del Tema

### 1. Características Generales de la Madera

#### 1.1. Definición

Se denomina *madera*<sup>2</sup> al conjunto de tejidos del *xilema*<sup>3</sup> que forman el tronco, las raíces y las ramas de los vegetales leñosos, excluidas la corteza y el cambium. Desde el punto de vista estructural, únicamente se utiliza la madera de los árboles, es decir, de *vegetales leñosos* de ciertas dimensiones. Vamos a entender por *vegetales leñosos* a las especies vegetales que presentan las siguientes características: a) son plantas vasculares, es decir, tienen tejidos conductores especializados en *xilema* y *floema*<sup>4</sup>; b) son plantas perennes, lo que significa que viven un cierto número de años; c) tienen un tallo principal que persiste de un año para otro el cual, en el caso de los árboles se denomina tronco; d) tienen crecimiento secundario, es decir, tiene un crecimiento del diámetro independiente del crecimiento longitudinal. Además, la madera es un material heterogéneo formado por un conjunto de distintas células especializadas incluidas en tejidos que llevan a cabo las tres funciones fundamentales del vegetal: i) la conducción de la savia bruta<sup>5</sup>; ii) la transformación y almacenamiento de los productos vitales; iii) el sostén del vegetal.

La pared inicial de la célula, que se forma durante su división en el período de crecimiento, se llama *pared primaria*. Durante su crecimiento la *pared primaria* aumenta de espesor y, cuando alcanza su tamaño máximo, se comienza a formar la *pared secundaria*, que está formada por capas concéntricas que crecen desde el centro de la célula.

En todas las maderas existen dos tipos de tejidos fundamentales:

- a) Los *prosequimatosos*, formados por células alargadas, fusiformes o filiformes<sup>6</sup>, firmemente unidas por sus extremos puntiagudos. Son de membrana engrosada y sin contenido protoplasmático, o muy poco.
- b) Los *parenquimatosos*, formados por células isodiamétricas de membrana delgada, no lignificados y con protoplasma parietal. Existen en mayor proporción en las maderas duras.

---

<sup>2</sup> Definición tomada de referencia bibliográfica [4]

<sup>3</sup> Xilema: tejido conductor especializado que constituye la *madera* del vegetal maduro.

<sup>4</sup> Floema: tejido conductor especializado que constituye la *corteza* del vegetal maduro.

<sup>5</sup> La savia elaborada circula por el floema.

<sup>6</sup> Con forma de huso o con forma de hilo respectivamente.

La madera es de los pocos organismos vivos que se utilizan en forma directa para dar origen a materiales de construcción y, como todos aquellos, con muy pocas excepciones, poseen algún tipo de *soporte mecánico* que da sostén al conjunto del árbol. En el reino animal este soporte está constituido por el esqueleto (interno o externo), que constituye una estructura portante específica destinada a cumplir tal función. Por el contrario, en el reino vegetal la estructura portante está distribuida en todo el xilema y constituida por las *paredes de las célula* –relativamente rígidas–, las que constituyen una parte muerta de ellas, segregada y mantenida por su parte viva, que es el protoplasma, y que dan origen a las *fibras*, elementos resistentes básicos de la madera. Esta característica particular de las maderas es la que da fundamento a sus propiedades mecánicas, es decir, a su capacidad resistente y, en consecuencia, a la posibilidad de su empleo en la construcción de estructuras portantes. Es por tal motivo que, en lo que sigue, prestaremos especial atención a la conformación de las *paredes celulares* de la madera.

Los vegetales leñosos comercial y estructuralmente utilizables, son esencialmente las *Coníferas*, pertenecientes al grupo de las *Gimnospermas*<sup>7</sup> y conocidas también como **maderas blandas**, y las *Frondosas*, incluidas en el grupo de las *Angiospermas*<sup>8</sup> y conocidas también como **maderas duras**. En general, las *maderas blandas* tienen semillas descubiertas y hojas perennes y las *maderas duras* semillas cubiertas y hojas caducas.

En la Tierra existen decenas de miles de especies de árboles estructuralmente utilizables, cerca de 80.000, y cada una de ellas posee un tipo particular de madera que le es propia y que, según las circunstancias, resultará más adecuada para tal o cual aplicación. Pese a esta enorme diversidad de especies, todas las maderas responden a unos pocos tipos anatómicos y contienen solo tres (3) clases de macromoléculas: 1) la celulosa cristalina, que es un polímero lineal compuesto por unidades de glucosa, con un grado de polimerización que va de 5.000 a 10.000; 2) la hemicelulosa, que es una molécula amorfa ramificada que contiene varios tipos de unidades de azúcares y con un grado de polimerización de entre 150 y 200; 3) la lignina, material polimérico tridimensional formado por unidades fenólicas. En consecuencia, la existencia de más de 80.000 especies implica la de más de 80.000 combinaciones posibles de estos tres (3) componentes básicos.

Como contrapartida de lo anterior, que ofrece para el Proyectista o el Constructor la muy buena posibilidad de poder seleccionar el material más adecuado para cada tipo de emprendimiento específico que se encare, la madera presenta una particularidad constitucional que no puede soslayarse al encarar su uso

---

<sup>7</sup> Del griego: semillas desnudas

<sup>8</sup> Del griego: semillas protegidas

ingenieril: su comportamiento resistente puede variar en forma significativa entre individuos de una misma especie e, incluso, en diversas zonas *del mismo individuo, tanto en sentido radial como axial*. Esto, más que un inconveniente, debe considerárselo un dato de la realidad, que habrá que tener en cuenta en todos los procesos de cálculo y de evaluación de la seguridad estructural y que deberá reflejarse, fundamentalmente, en los documentos que los orientan y reglamentan.

## 1.2. Maderas duras y maderas blandas

Como terminamos de ver y salvo contadas excepciones, las maderas se agrupan en dos grandes conjuntos: las *maderas blandas (coníferas)*, como es el caso de los pinos, y las *maderas duras (latifoliadas)*, por ejemplo los robles. Esta clasificación tiene que ver, fundamentalmente, con las características de su estructura funcional interna: en las ***blandas***, la función resistente y la de conducción de fluidos es cumplida por los mismos elementos denominados *troqueidas longitudinales* (fig. 1), mientras que en las ***duras*** cada una de estas funciones es cumplida por un sistema específico: la conducción de fluidos por medio de *vasos* y la función portante mediante *fibras* (fig. 2). Desde el punto de vista resistente el panorama es el siguiente:

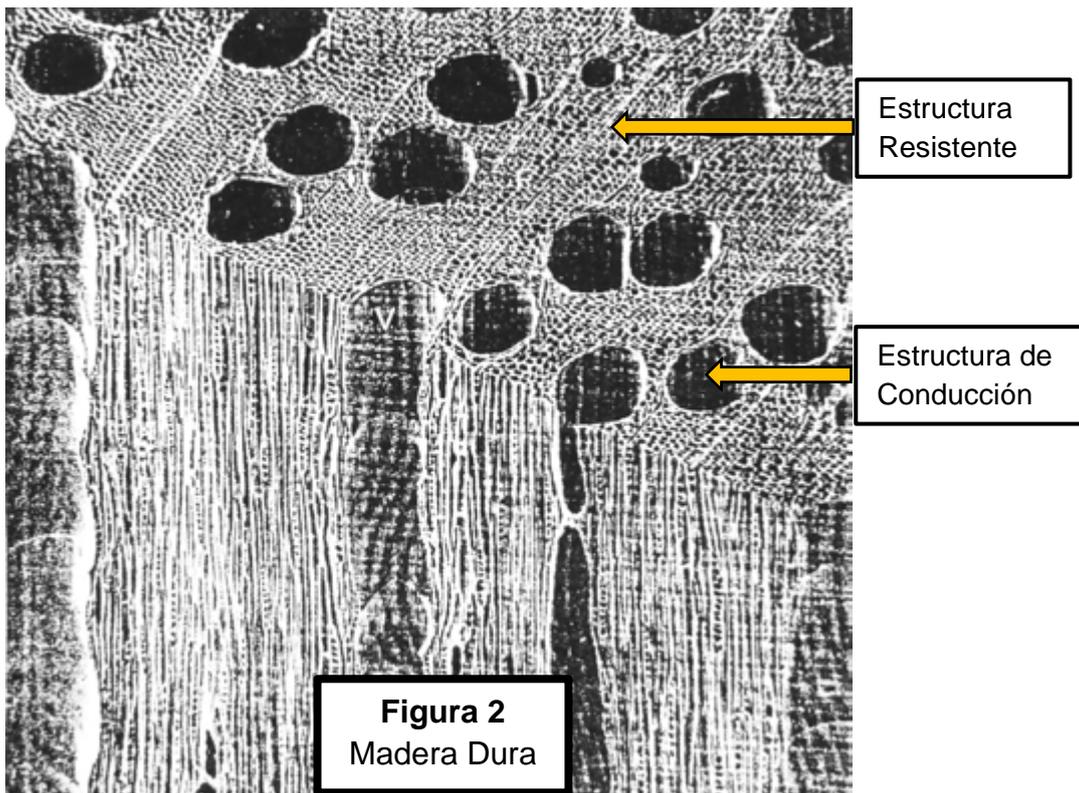
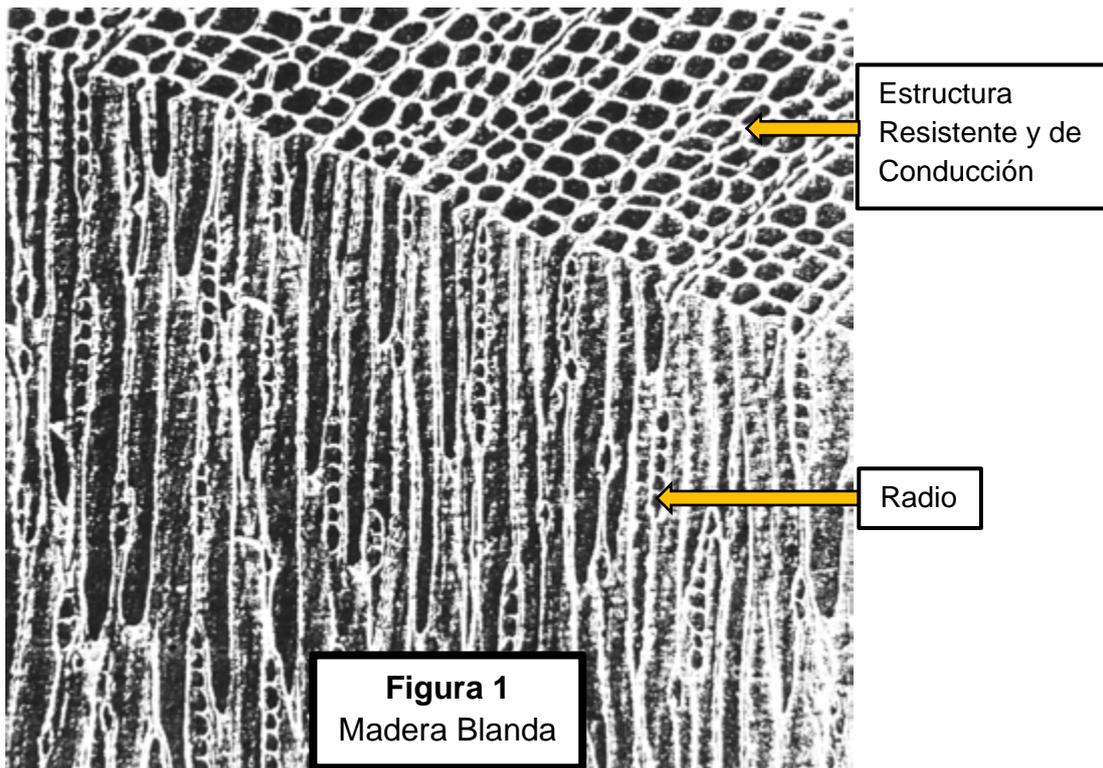
- a) El tejido de las maderas blandas se integra con tres (3) tipos de componente:
  - i) *traqueidas*, tejido fibroso lignificado que se presenta en todas las maderas;
  - ii) *parénquimas*, elementos de almacenamiento del cambium que, cuando este se aleja del eje del árbol debido a su crecimiento radial, pierden su utilidad y se integran al tejido de sostén;
  - iii) *elementos transversales*, que en este caso solo son radios leñosos cuya constitución es igual a la del tejido vertical (*traqueidas radiales* y *parénquima*). Su función resistente es similar a la de las armaduras en el hormigón, por lo que resulta esencial.

A título de idea general se puede decir que, normalmente, las *maderas blandas* tienen menor densidad que las *duras*. En principio, la diferencia entre *troqueidas* y *fibras* está en la capacidad, o no, de conducir fluidos.

Las características dimensionales de las celdas de cada una de estas categorías, son las que se indican en el Cuadro 1.

**CUADRO 1:** Características dimensionales de las Celdas

Tipo de Madera	Diámetro (mm)	Longitud (mm)
Blanda	2 a $8 \cdot 10^{-2}$	3 a 5
Dura	$< 2 \cdot 10^{-2}$	0,7 a 3



Las figuras 1 y 2 fueron tomadas de la referencia bibliográfica [1]

En lo que hace a las diferencias funcionales entre maderas *blandas* y *duras*, tenemos las siguientes:

- a) Las **maderas blandas** tienen una estructura básica uniforme –que conforma el tronco– constituida por largas fibras formadas por células tubulares alargadas, llamadas *traqueidas longitudinales*, con extremos en punta, los que se superponen en células sucesivas, paredes formadas por espesas células secundarias y sin células vivas en su madurez. Estas *traqueidas longitudinales* constituyen alrededor del 90% del volumen del tronco y su espacio central abierto se utiliza para la conducción de fluidos, proceso que se posibilita por la existencia de orificios situados en las áreas superpuestas de los extremos en punta de las células, lo que permite que aquellos fluyan entre una y otra. Por otra parte, esta superposición entre los extremos de células sucesivas es lo que origina la resistencia a esfuerzos normales de las *traqueidas*. En resumen, en las *maderas blandas* las células largas cumplen la doble función de resistencia y transporte (fig. 1). Además, algunas especies de estas maderas, como los pinos, poseen canales axiales para el transporte de resina, que no cumplen funciones resistentes. En estas maderas los *radios* están formados por conjuntos de pequeñas células de parénquima que el árbol utiliza para almacenar alimentos.
- b) Por el contrario, en las **Maderas Duras** las funciones de conducción y sostén se realizan mediante dos tipos de células diferentes: i) los vasos de conducción están constituidos por células específicas de gran diámetro, colocadas una a continuación de la otra en la dirección longitudinal del tronco que pueden transportar los fluidos a largas distancias y por todo el árbol, pero no aportan resistencia; ii) la función resistente, por su parte, se materializa mediante *fibras* alargadas estructuralmente modificadas a tal fin, constituidas por células alargadas terminadas en punta y normalmente de paredes gruesas. El volumen de *fibras* que contienen las maderas duras varía mucho y oscila entre el 26%, para el liquidámbar, y el 67% para el nogal.

En general la densidad de las *maderas duras* tiende a ser mayor que la de las *blandas*, debido a un menor porcentaje de espacios huecos.

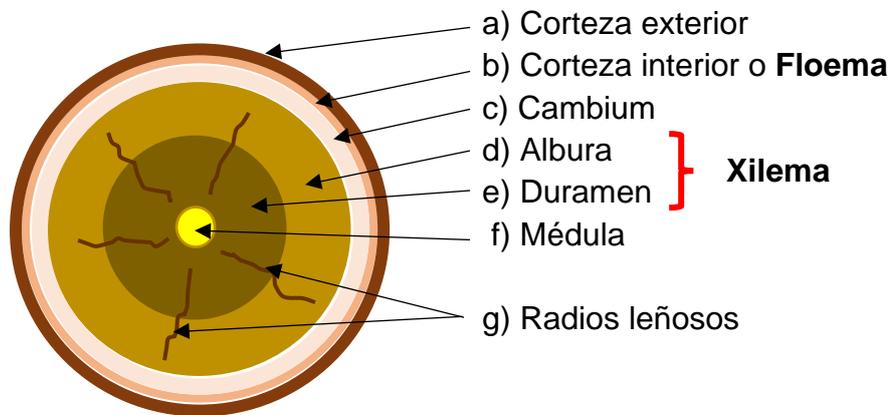
La estructura celular de las ramas es muy diferente de la del tronco que terminamos de describir y su utilidad resistente es discutible, por lo que no las consideraremos.

## 2. Estructura Resistente Interna de la Madera

### 2.1. El árbol, origen de la madera

A escala macroscópica el árbol, que como vimos es el elemento natural del que se obtiene la madera, está constituido por diferentes áreas que se ubican

circunferencialmente en torno al eje de crecimiento. Si se efectúa el corte transversal de un tronco, se tienen las zonas indicadas en (fig. 3).



**Figura 3**

Estas zonas, con diferente participación en el crecimiento del árbol y consideradas desde el exterior al interior, son las siguientes:

- a) Corteza exterior, constituida por tejido muerto y seco que da protección al árbol y que, como vimos, no se considera madera al igual que las dos zonas siguientes;
- b) Corteza interior o floema, conjunto de tejidos vivos especializados en la conducción de savia elaborada a todas las partes en crecimiento del árbol;
- c) Cambium, meristema lateral del tejido vascular de las plantas que es el origen del xilema secundario (que crece hacia adentro) y del floema secundarios (que crece hacia afuera), constituyen el tejido permanentemente vivo del árbol y genera su crecimiento radial.

A partir de acá tenemos el Xilema, que está constituido por las siguientes regiones:

- d) Albura, zona ligeramente coloreada que forma la parte exterior del tronco del árbol, contiene algunas células vivas que son las que transportan la savia sin elaborar desde las raíces hasta las hojas. A medida que se crean nuevas capas de albura durante el crecimiento lateral del árbol, las próximas al duramen van perdiendo sistemáticamente su función conductora y se van incorporando a este;
- e) Duramen, es la región interna más antigua del árbol y está constituida por células muertas, es en general más oscura que la albura y proporciona resistencia al árbol, constituye esencialmente la zona de utilización estructural;
- f) Médula, tejido blando situado en el centro del árbol alrededor del cual se produjo el primer crecimiento de este, tiene poca importancia, generalmente es de pequeño diámetro y se deshecha en los procesos de transformación de la madera para su utilización como material resistente, debido a que sus características físicas y mecánicas en general son deficientes;

g) Radios leñosos, son en parte responsables de la contracción de la madera, aumentan la resistencia a la propagación de rajaduras o fisuras en sentido tangencial y también aumentan la resistencia a la compresión radial. Así mismo aumentan la resistencia a la compresión longitudinal limitando la propagación de las fisuras originadas en el tipo de comportamiento que se analiza más adelante en el punto (6). Dado que se trata de elementos “radiales”, al alejarse del eje del árbol se separan, cuando esta separación llega a un cierto valor aparecen, entre radios sucesivos, nuevos radios que hacen que la distancia entre ellos se mantenga aproximadamente constante a medida que nos alejamos del centro.

## 2.2. El Cambium, origen de la estructura interna de la madera

Como se indica en el punto (2.1.c), los diferentes tipos de células que constituyen el *xilema*, o madera, se originan por división de las células de la zona interna del *cambium* las que se lignifican formando células leñosas y sufren en su desarrollo, según los casos, las transformaciones necesarias para poder cumplir sus dos funciones específicas: 1) el *crecimiento* del árbol en longitud y en diámetro; 2) la conformación de las diferentes células que darán origen al *tejido leñoso* y la consiguiente modificación de sus paredes. Es sobre este último proceso en el que haremos especial hincapié, pues está directamente relacionado con las cualidades resistentes de la madera.

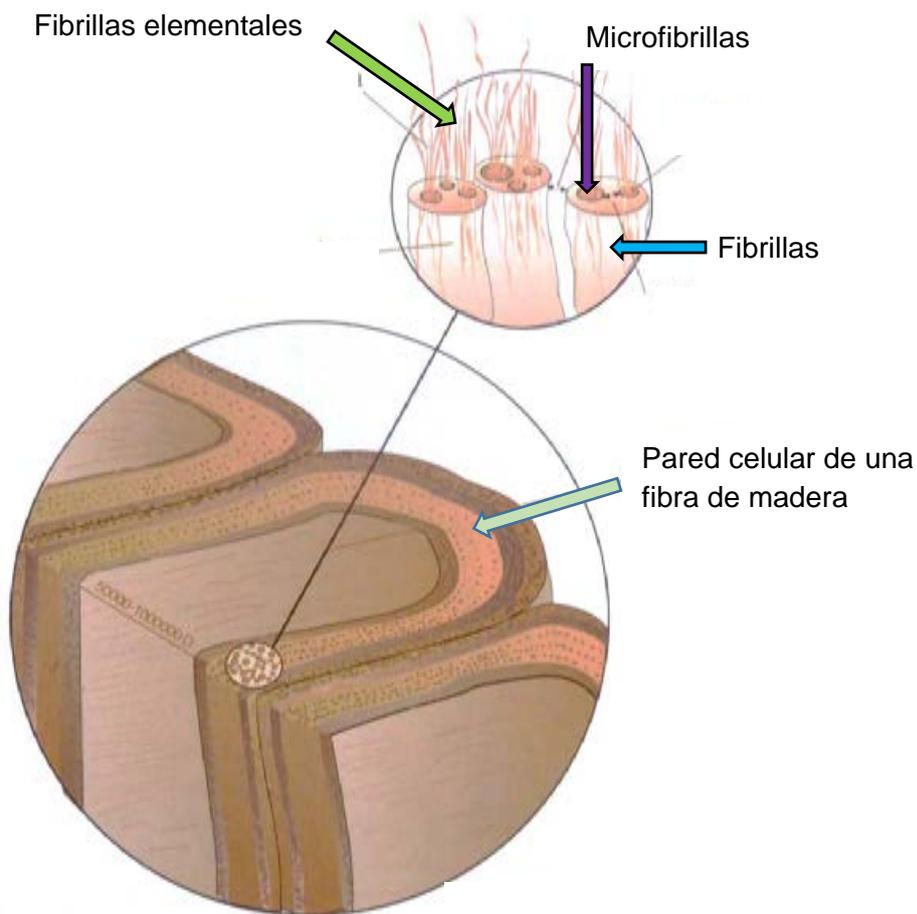
## 2.3. Constitución básica de los elementos resistentes de la madera

La madera puede considerarse como un “*material compuesto*”<sup>9</sup> integrado por dos (2) fases: una matriz polimérica en la que están inmersas fibras tubulares largas con buena resistencia a tracción, que son también poliméricas y que se encuentran alineadas en dos direcciones del tronco: longitudinal y radial. En consecuencia, las propiedades mecánicas de la madera van a estar determinadas, esencialmente, por dos componentes: a) la resistencia y orientación de las fibras que actúan como refuerzo; b) la matriz que las aglutina haciendo que resistan trabajando en conjuntos muy numerosos; c) la adherencia entre fibras y matriz.

A fin de encuadrar adecuadamente las consideraciones que siguen, va a resultar útil plantear un esquema general sobre la constitución de las paredes celulares que conforman una *fibra* o una *traqueida* de madera (fig. 4), cuyas estructuras internas son semejantes por lo que a partir de ahora incluiremos a ambas bajo la denominación genérica de “fibras”. Estas *fibras* están compuestas por gran número de *fibrillas*, las que a su vez se componen de *microfibrillas* que se conforman a partir de *fibrillas elementales* (fig. 5).

---

<sup>9</sup> Tomado este término con el sentido que le da la Resistencia de Materiales



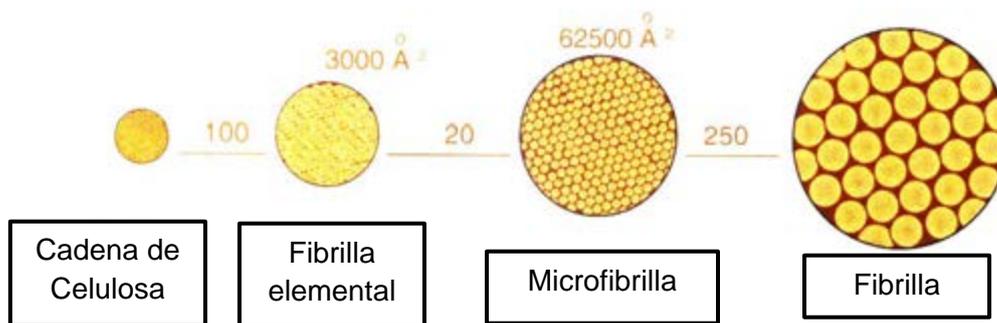
**Figura 4: Estructura de la pared celular**  
(Figura tomada de referencia bibliográfica 4)

En consecuencia, se tiene que (fig. 5):

- 1) Cada **fibrilla elemental**, que puede considerarse como la unidad básica supramolecular, está constituida por unas 100 *cadena de celulosa simple* y tiene un área transversal de  $3 \cdot 10^{-11}$  ( $\text{mm}^2$ ).
- 2) A su vez, cada **microfibrilla** está formada por unas 20 *fibrillas elementales* y su área transversal es del orden de  $7 \cdot 10^{-10}$  ( $\text{mm}^2$ ). Las *microfibrillas* están constituidas por un núcleo cristalino de celulosa, rodeado por una región amorfa de hemicelulosa y lignina.
- 3) Finalmente, las **fibrillas** están compuestas por unas 250 *microfibrillas* y su área transversal es de  $1,6 \cdot 10^{-7}$  ( $\text{mm}^2$ )<sup>10</sup>. En resumen:

1 fibrilla=250 microfibrillas=5.000 fibrillas elementales=500.000 cadenas de celulosa

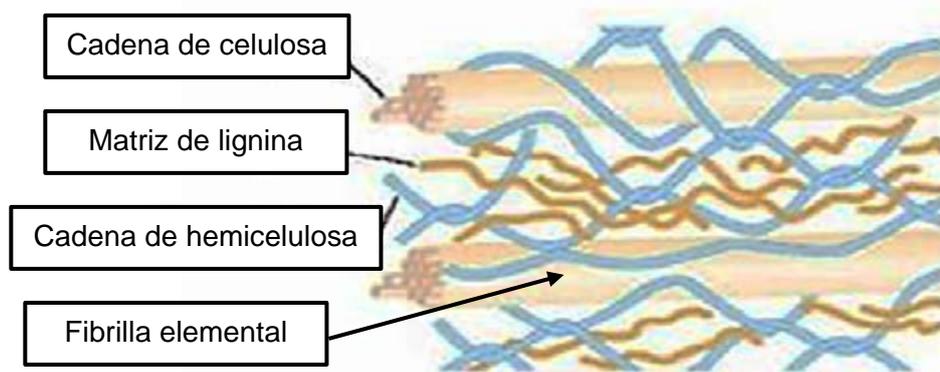
<sup>10</sup> Para poder fijar un orden de magnitud, una fibra de algodón visible a simple vista, puede estar compuesta por 1.500 fibrillas.



**Figura 5**

(Figura tomada de referencia bibliográfica 4)

### 2.3.1. Microfibrillas



**Figura 6<sup>11</sup>**

Las *microfibrillas* están formadas por tres (3) tipos de componentes: **a)** fibras de **celulosa** polimerizada parcialmente cristalina –las denominadas *fibrillas elementales*–; **b)** fibras de **hemicelulosa**; se encuentran alineadas en varias direcciones con relación al eje de las *microfibrillas*; **c)** el conjunto está inmerso en una matriz de **lignina** también polimerizada (fig. 6). Esta disposición genera una buena resistencia a tracción en la dirección longitudinal de las *microfibrillas*. La disposición y orientación de las microfibrillas varía en las diferentes capas de la pared celular

Desde el punto de vista de su composición orgánica, las maderas están formadas por los tres constituyentes principales citados: **a)** las fibras de *celulosa*, material este último que se puede definir como un homopolímero lineal

<sup>11</sup> En esta figura, a fin de lograr una mejor comprensión, se indica la distribución de los componentes químicos, en la realidad las fibras de celulosa están entrelazadas con las de hemicelulosa y ambas con la lignina, que cumple la función de material cementante.

termoplástico de origen natural con un grado de polimerización del orden de entre 5.000 y 10.000, estas fibras constituyen entre el 40 y 50% de las maderas; **b)** las fibras de *hemicelulosa*, que son también un polímero ramificado natural con un grado de polimerización del orden de 200, constituye entre el 25 y el 35% de las maderas; **c)** la *lignina*, cemento orgánico de bajo peso molecular que aglutina los diversos componentes de la madera, se encuentra presente en un 20 a 30% y su estructura aún no ha sido identificada en su totalidad..

Las ligninas proporcionan rigidez a la pared de las células y resistencia a las sollicitaciones de compresión, las microfibrillas aportan resistencia a tracción y también a compresión, en la medida en que las ligninas les impiden pandear y los radios limitan la propagación de las fisuras longitudinales. Por su parte, las fibrillas de celulosa dan propiedades elásticas al conjunto.

En consecuencia, el componente básico de la madera es la *celulosa* ( $C_6H_{10}O_5$ ), que se organiza en largas cadenas poliméricas, la mayor parte de las cuales son segmentos cristalinos que se encuentran separados entre sí por pequeños tramos de celulosa amorfa. El *enlace covalente* dentro y entre las unidades de celulosa, crea una macromolécula fuerte y tenaz con elevada resistencia a la tracción. Siguiendo con el análisis del origen de la resistencia mecánica de las maderas, se tiene que: un cierto número de estas cadenas de celulosa –del orden de 100– se agrupan y quedan recubiertas por una capa de cadenas de hemicelulosa amorfa aleatoriamente orientadas respecto de la dirección de las cadenas de celulosa, el conjunto da origen a las microfibrillas. Finalmente, la hemicelulosa está recubierta por lignina, material polimérico tridimensional formado por unidades fenólicas muy complejas y con entrecruzamientos, que confiere rigidez a las paredes de las células y aportan resistencia a compresión a las maderas. Unas 20 fibrillas elementales inmersas en la lignina amorfa originan una microfibrilla, las que pueden alcanzar grandes longitudes (fig. 5).

### 2.3.2. Fibras

Como ya dijimos, el presente análisis de los componentes básicos de la madera denominados *fibras*, incluye tanto a las *traqueidas* de las maderas blandas como a las *fibras* propiamente dichas de las duras.

Las ***fibras*** huecas, alargadas, con longitudes del orden de 100 veces su ancho, están formadas por *microfibrillas*, organizadas en varias capas. Constituyen aproximadamente el 95% del material sólido de la madera (figs.5 y 6).

Las *fibrillas*, que son los componentes básicos de la pared celular leñosa de las *fibras*, están organizadas en tres (3) capas sucesivas, una de ellas dividida a su vez en tres (3) subcapas, consta principalmente de microfibrillas unidas por un material cementante que es la lignina. Este último material, la lignina, está presente en la pared celular en proporciones decrecientes, entre 60 y 90% en la

laminilla media por lo que mantiene a las células unidas entre sí, hasta 10% en la subcapa 2. Enumeradas desde afuera hacia adentro, estas capas y subcapas son las siguientes (figs. 7y 8):

**a) Laminilla media**, constituye la pared intercelular y está compuesta principalmente de lignina y hemicelulosa, es isótropa y, debido a su poder cementante, constituye la componente que da cohesión al conjunto de las *microfibrillas* originando así las *fibras*.

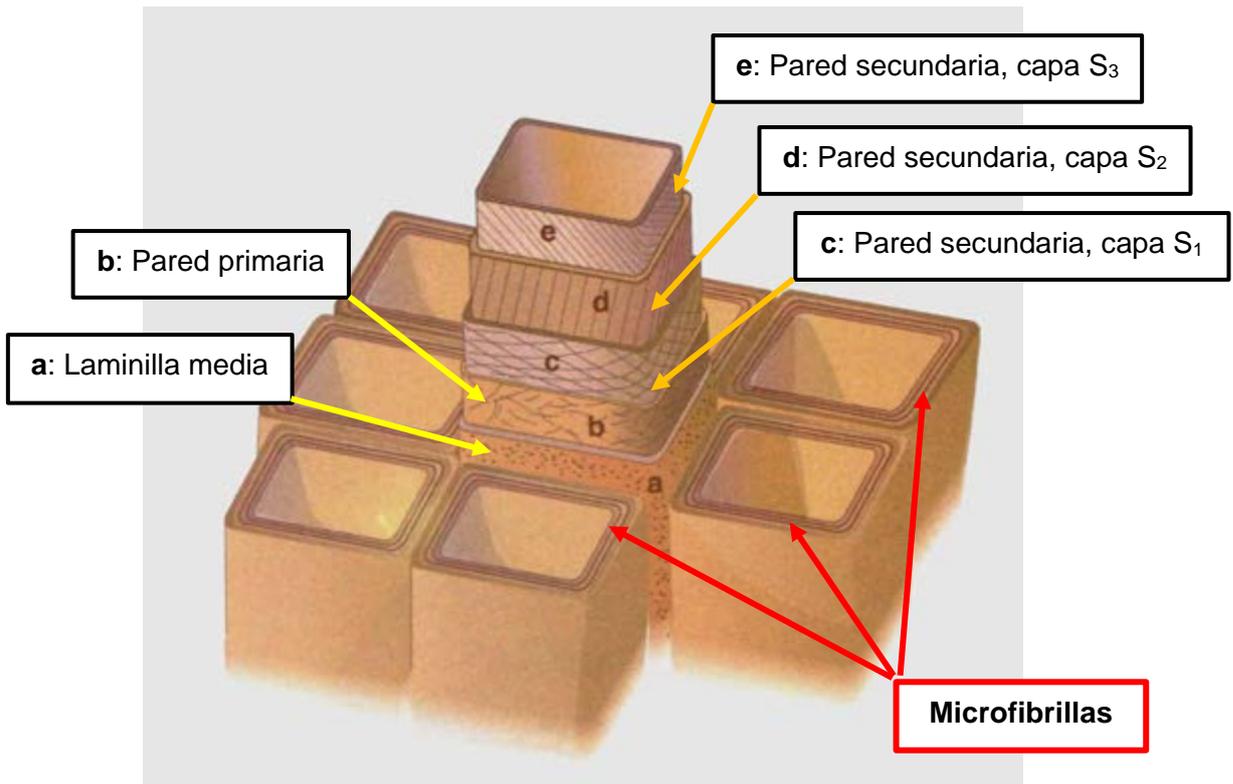
**b) Pared primaria**. Es muy delgada y anisótropa pues la orientación de las microfibrillas en ella está bien definida, aunque se presentan bastante desordenadas forman un ángulo grande con el eje de la fibra. Está formada principalmente por celulosa fuertemente lignificada.

**c) Pared secundaria, subcapa 1**. Constituye la capa exterior de la pared secundaria y es muy delgada. Está constituida principalmente por celulosa con pequeñas incrustaciones de lignina, esta reducida presencia de lignina se debe a la mayor proximidad que mantienen entre sí las fibrillas de celulosa. Está formada por varias laminillas con las microfibrillas de cada una orientadas según ángulos opuestos respecto de sus vecinas (del orden de los 70° respecto al eje de la fibra).

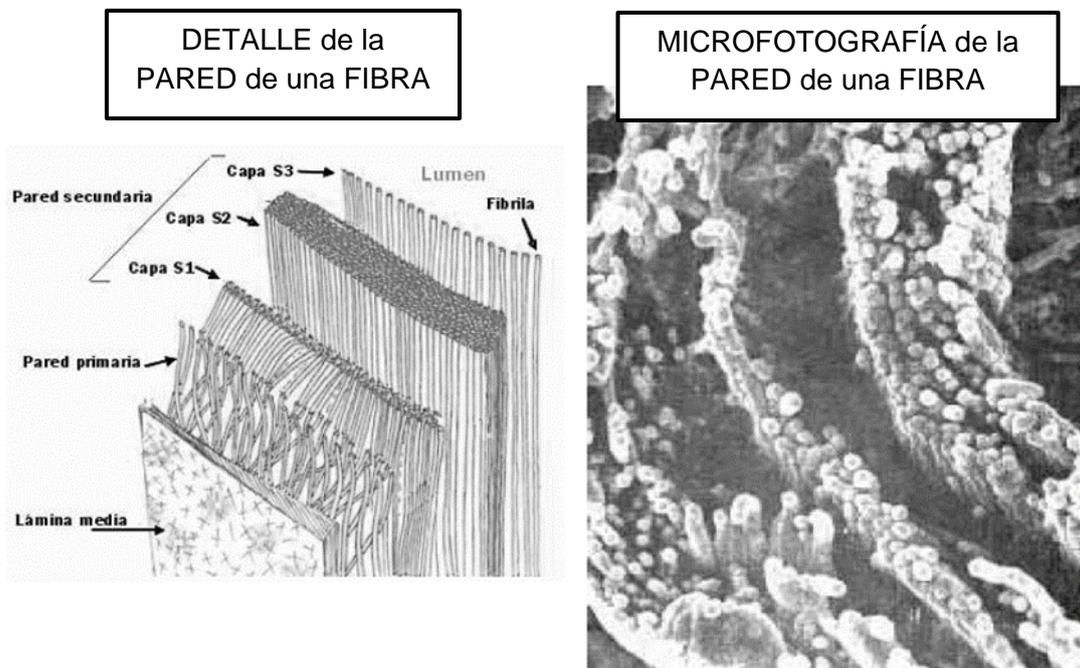
**d) Pared secundaria, subcapa 2**. Constituye la capa media de la pared secundaria y es la más gruesa de las tres. Está constituida principalmente por celulosa con pequeñas incrustaciones de lignina, cuya cantidad es reducida, como en el caso anterior, debido a la proximidad que existe entre las fibrillas de celulosa. Está formada por varias laminillas pero ahora, a diferencia de lo que ocurre en la subcapa 1, con las microfibrillas de cada una de ellas orientadas en la misma dirección, la que difiere de una a otra, forman un ángulo de aproximadamente 30° respecto del eje de la fibra.

**e) Pared secundaria, subcapa 3**. Constituye la capa interior de la pared secundaria, es la más delgada de las tres y a veces no existe. Está constituida principalmente por celulosa con pequeñas incrustaciones de lignina y formada por varias laminillas con las microfibrillas de cada una orientadas en la misma dirección y formando un ángulo de aproximadamente 30° respecto del eje de la fibra.

En resumen, y desde el punto de vista del empleo estructural de las maderas, las fibras que constituyen su estructura biológica interna son largas, unas cien (100) veces más largas que anchas ( $4,5 \cdot 10^{-2}$  y  $4,5 \cdot 10^{-4}$  mm), y aportan la resistencia a tracción del material. Por su parte, la resistencia a compresión viene originada por éstas y por las ligninas que les impiden separarse.



**Figura 7**  
(Tomada de referencia bibliográfica 4)



**Figura 8**

## 2.4. Fundamento del comportamiento resistente de la madera

Vimos, en el apartado anterior, cómo se originan las propiedades mecánicas de las maderas a partir de su constitución celular, es decir, su resistencia y deformabilidad. Desde este enfoque, y considerando ahora el tronco en su conjunto, estamos en condiciones de suponer, en forma genérica, que la madera se puede considerar como un *material compuesto* constituido por dos (2) elementos:

- 1) una *matriz* tridimensional, integrada en la forma que terminamos de ver que, con suficiente aproximación, puede suponerse *continua*, *homogénea* y *anisótropa*;
- 2) un conjunto de heterogeneidades puntuales distribuidas en la matriz según determinadas pautas.

En resumen, la matriz está formada por un conjunto de elementos unidimensionales denominados *fibras*, sensiblemente paralela entre sí y orientadas en la dirección del crecimiento del tronco de árbol, las que poseen buena resistencia a tracción y también una considerable resistencia a compresión. Este ordenamiento de las fibras es lo que origina la marcada anisotropía mecánica de las maderas. La resistencia a compresión en sentido transversal al eje es mucho menor que en sentido longitudinal, la resistencia a tracción en las mismas condiciones es baja, del mismo orden de magnitud que la anterior y poco confiable, por lo que en lo posible conviene no tenerla en cuenta en los cálculos. La resistencia al corte, que pone en juego tanto tracciones como compresiones, en sentido longitudinal está gobernada por las propiedades que terminamos de comentar y rompe, en cada caso, según la menor de ellas, es decir, la resistencia a compresión. La resistencia al corte en sentido transversal no es confiable por lo que no debería ser tenida en cuenta. En consecuencia, la resistencia resulta aceptable para solicitaciones de tracción, compresión y flexión simple en sentido longitudinal<sup>12</sup> y despreciable en sentido transversal. Cabe a este respecto una aclaración, si bien la resistencia a compresión en sentido radial es baja, resulta confiable pues, alcanzada la rotura, el material se desorganiza pero no puede desaparecer, por lo que sigue en condiciones de aceptar líneas de carga internas.

En el Cuadro 2 siguiente se consignan, a título informativo<sup>13</sup> y al solo efecto de indicar un orden de magnitud, las resistencias relativas de algunas de las maderas de uso más común<sup>14</sup> refiriéndolas a la resistencia a tracción simple ( $f_{mu}$ ).

---

<sup>12</sup> El corte siempre va acompañado de flexión.

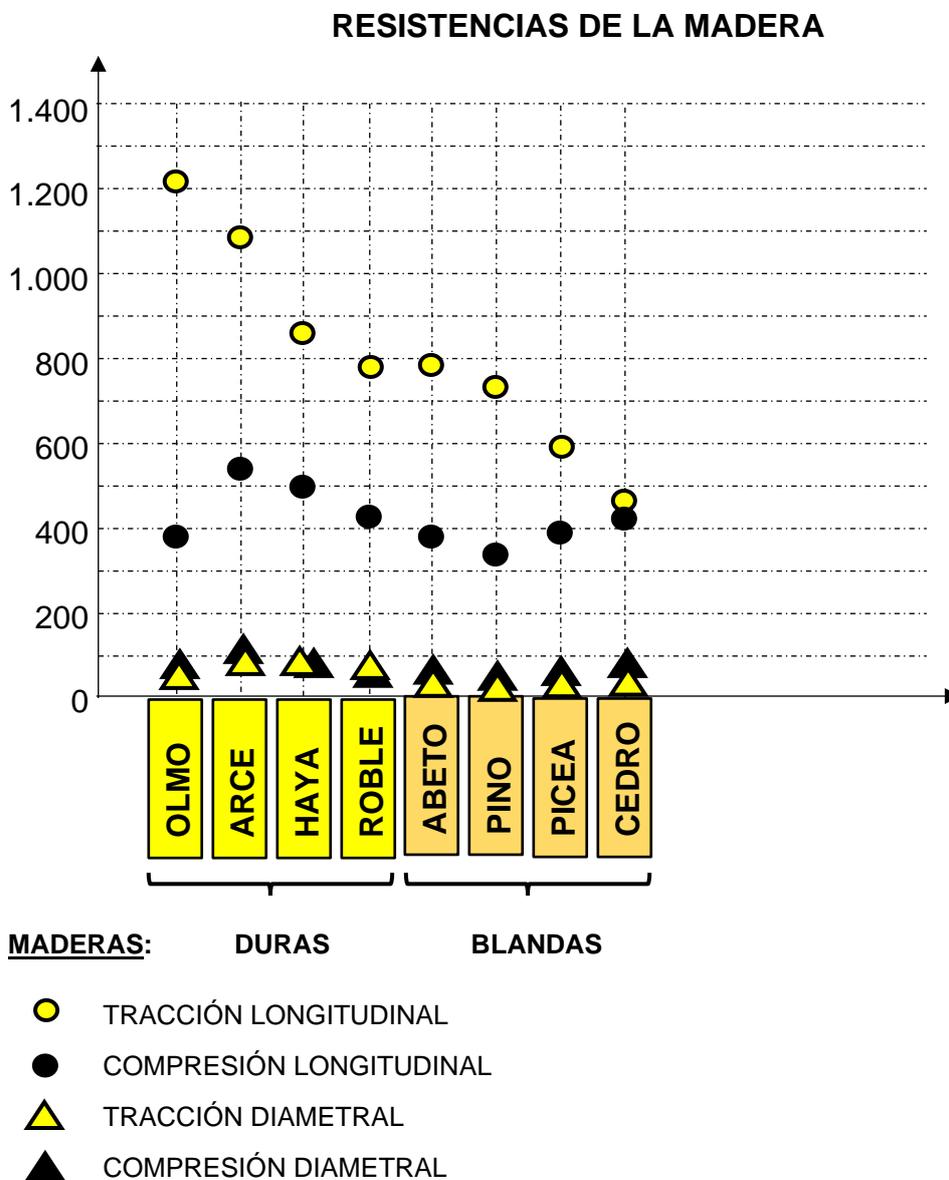
<sup>13</sup> Esto es así debido a la muy grande cantidad de especies de árboles de uso estructural existentes y a la significativa dispersión de los resultados de ensayo realizados en las mismas condiciones.

<sup>14</sup> Datos “The Encyclopedia of Wood” tomados de referencias bibliográficas 2 y 3.

**CUADRO 2:** Valores de las resistencias referidos a la Tracción Longitudinal ( $f_{mu}$ )

$(f_{mu})$	Maderas Duras	Maderas Blandas
Compresión Longitudinal	1/2	1/1,7
Tracción Radial	1/12	1/25
Compresión Radial	1/8	1/6
Corte	1/7	1/9

En (fig. 9) se representan los valores individuales de los que se obtuvieron estos promedios.



**Figura 9**

Como se puede observar en el gráfico de (fig. 9), la resistencia a tracción pura tiene un rango de variación mayor que el de la resistencia a compresión pura, lo que seguramente se origina en la diferencia de los mecanismos de rotura que se ponen en juego en ambos casos. La resistencia a tracción se origina en la resistencia de las *fibrillas*, por lo que el mecanismo de rotura va a ser el de un cable: las primeras que rompen son las *fibras* más débiles y la rotura del elemento se produce cuando han roto una cantidad suficiente de *fibras*. El mecanismo de rotura por compresión se produce por el crecimiento de fisuras longitudinales paralelas a las *fibras* y ubicadas entre estas, es decir, en la masa de lignina, y a su crecimiento se opone la resistencia a tracción de esta última y la distribución y mayor o menor presencia de los *radios leñosos*.

Desde el punto de vista estructural, a la matriz descrita, con la que se obtendrían cuerpos *continuos*, *homogéneos* y marcadamente *anisótropos*, en las maderas naturales se agregan defectos localizados, estos son fundamentalmente de dos (2) tipos: 1) fisuras y oquedades, que rompen la continuidad geométrica pero no forzosamente la mecánica; 2) nudos<sup>15</sup> (fig. 10) que alteran en forma puntual la homogeneidad y transforman al material en heterogéneo. Dado que el número de *nudos* por unidad de volumen del material puede variar entre límites amplios, la heterogeneidad de las maderas también lo hará. Esto último es, así mismo, un dato de la realidad que no se puede soslayar en el análisis de las maderas como material resistente.



**Figura 10**

En resumen, en los casos en que ello resulte conveniente, los cuerpos resistentes de madera se pueden caracterizar como un material de base,

---

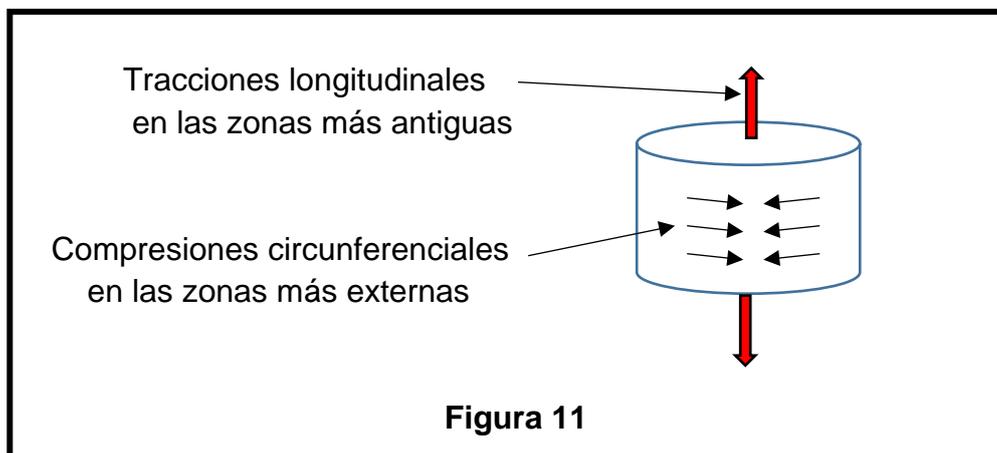
<sup>15</sup> Tejido leñoso que una rama inserta en un troco.

*continuo, homogéneo y anisótropo*, cuya aptitud resistente se puede interpretar por medio de una teoría relativamente sencilla, más un conjunto de defectos, en general localizados, que son los que originan la *heterogeneidad*, en diferente grado, y que obligan a introducir en la teoría modificaciones y adecuaciones específicas que disminuyen su aptitud resistente.

### 3. Estado de Coacción de la Madera. Sus Consecuencias Estructurales

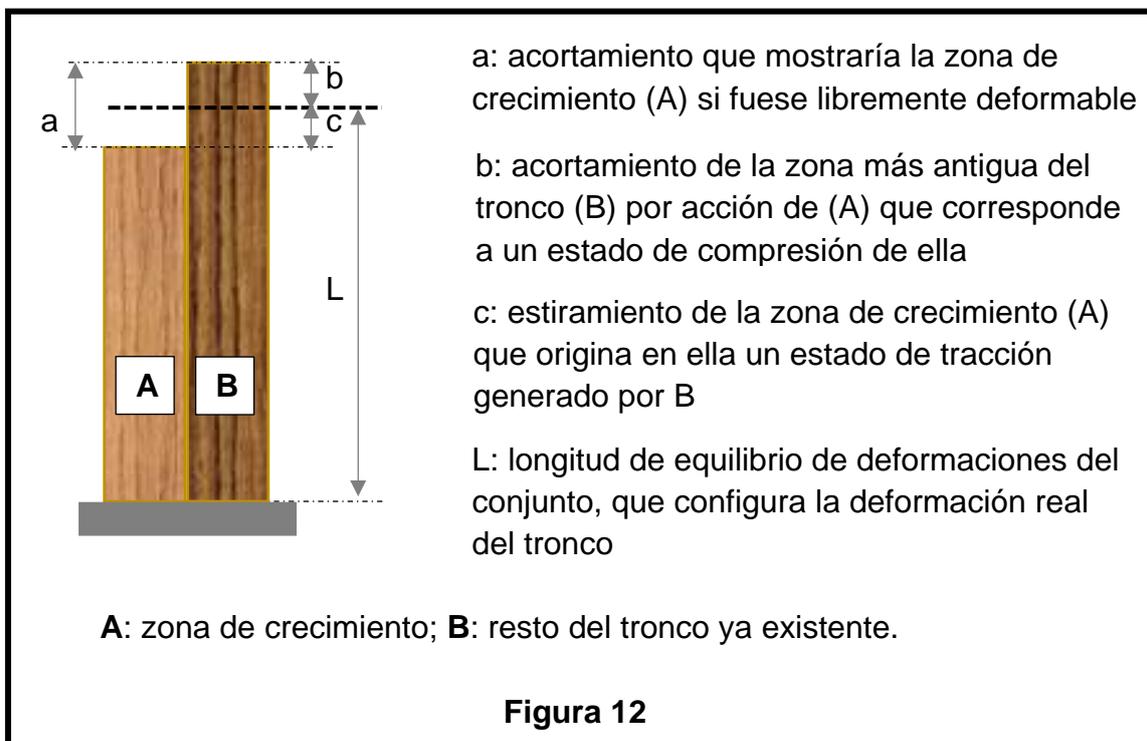
El crecimiento del árbol produce, en la madera que lo constituye, estados tensionales internos que, si no existen cargas externas, inevitablemente se deben encontrar en equilibrio entre sí, o sea, que deben tener resultante nula. Se los denomina *estados de coacción*. Los estados de coacción pueden producir fisuras internas en el árbol cuando las tensiones superan en algún punto su resistencia a tracción, lo que significa que estas fisuras estarán contenidas en planos paralelos al eje de crecimiento. Cuando se corta el tronco para industrializarlo, es decir, cuando se lo divide en dos o más trozos y aparecen nuevas superficies externas, el estado de equilibrio de las tensiones de coacción se rompe y aparecen, en los nuevos elementos de madera así obtenidos, efectos más graves y evidentes. Las *tensiones de coacción* se originan de la forma que se describe a continuación.

En las primeras etapas del crecimiento de las células (división, estiramiento), sus paredes son muy blandas y no pueden soportar tensiones importantes, por lo que se deforman y acomodan a las circunstancias que les toca enfrentar. Luego, durante la etapa de maduración, las paredes de las fibras y traqueidas se engrosan y endurecen debido al depósito de microfibras de celulosa embebidas en una matriz de hemicelulosa y lignina. Este proceso natural de polimerización produce incrementos de la rigidez (menor deformabilidad) y pequeñas deformaciones en la zona de crecimiento, usualmente acortamientos longitudinales y engrosamientos radiales de las fibras, los que son del orden de un centésimo a un milésimo de las dimensiones iniciales.

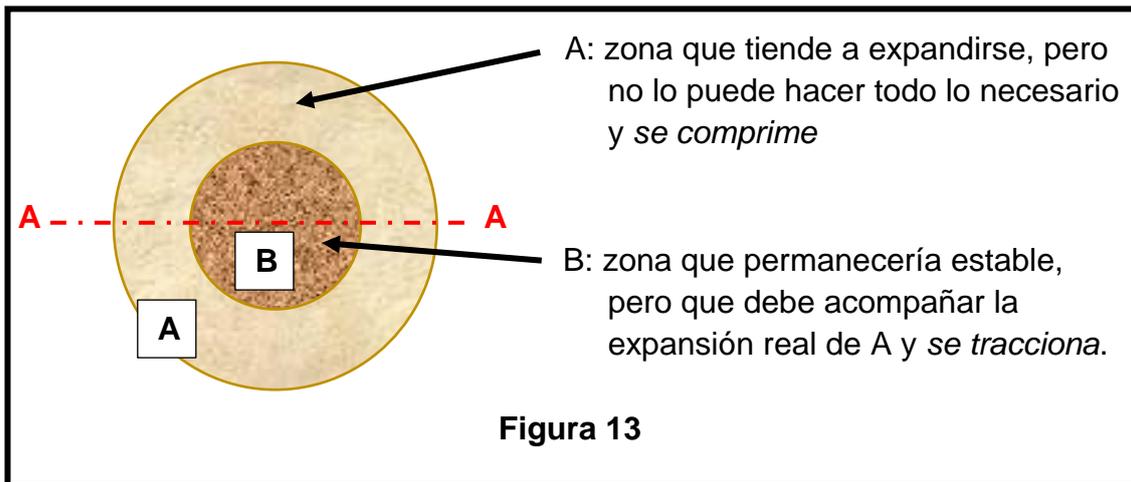


La deformación longitudinal de la zona de crecimiento, su tendencia a acortarse, se ve parcialmente impedida por la madera sólida que ya existe en las zonas más rigidizadas (las ubicadas más al interior del tronco), lo que produce tracciones longitudinales en aquella (fig. 11).

El proceso mecánico mediante el cual se originan estas tracciones longitudinales en las zonas de crecimiento, responde al siguiente esquema (fig. 12): 1) las zonas de crecimiento (A, en la figura) tienden a acortarse; 2) las zonas restantes del tronco (B, en la figura) tienden a permanecer dimensionalmente invariables; 3) como entre las dos zonas citadas no puede haber desplazamientos relativos (existe solidaridad de deformaciones entre ellas), ambas se ven obligadas a acortarse lo mismo, lo que origina tracciones en (A), compresiones en (B) y esfuerzos cortantes longitudinales en planos tangentes; 4) dado que no hay acciones exteriores dignas de tenerse en cuenta (el peso propio de la madera puede despreciarse), las tracciones y compresiones señaladas forman un sistema en equilibrio, es decir, con resultante nula, por lo que el área comprendida entre el eje de referencia y el diagrama de tracciones (fig. 14) es igual a la que existe en la zona de compresiones del diagrama, además, en las condiciones planteadas, la tangente al diagrama en correspondencia con la superficie exterior va a ser horizontal. En el resto del diagrama de tensiones la inclinación de la tangente (su derivada primera) es función del esfuerzo de corte actuante. Así aparecen los diagramas de coacción.

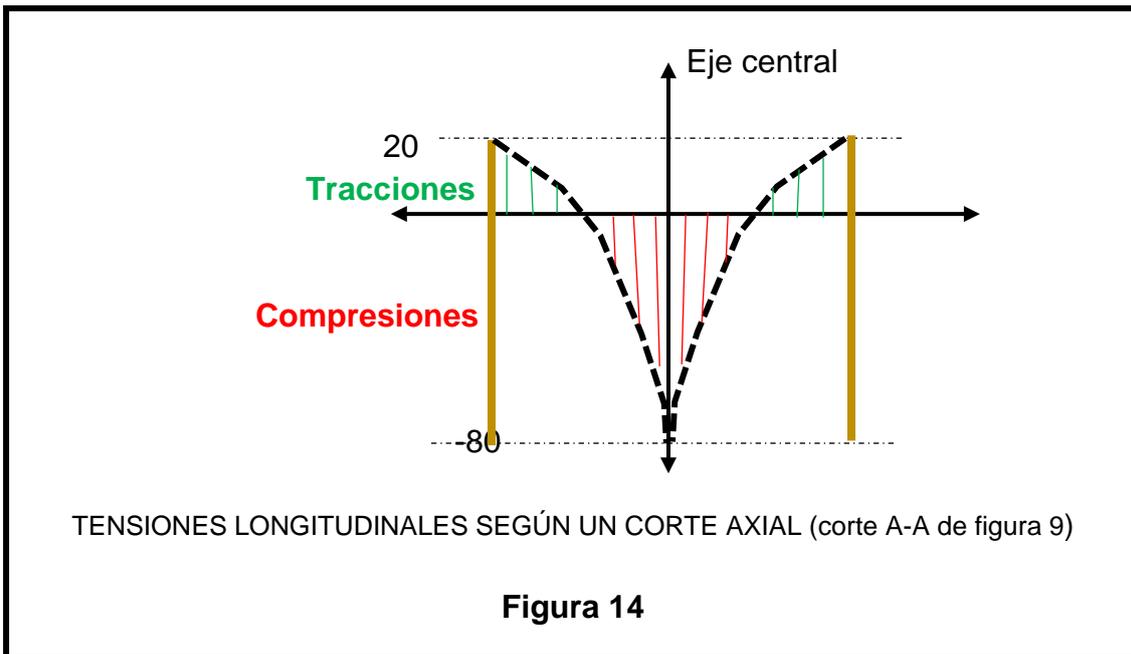


En forma similar se originan las compresiones superficiales circunferenciales (fig. 13): a) la zona de crecimiento (A) tiende a expandirse, pero no lo puede hacer en la magnitud necesaria debido a la presencia de zonas más antiguas, firmemente vinculadas a ellas, que no sufren variaciones dimensionales por lo que se originan compresiones en (A); b) las zonas de madera más antiguas (B), que de estar aisladas permanecerían dimensionalmente estables, al tener que acompañar a (A) en su deformación se traccionan.



En resumen, cuando un trozo del tronco de un árbol que luego será cortado, aún permanece en el árbol, está sometido a un campo de tensiones de crecimiento caracterizado por: a) tracciones longitudinales cerca de la corteza que cambian gradualmente a compresiones longitudinales cerca de la médula (fig. 14); b) tracciones transversales cerca de la médula que cambian gradualmente a compresiones transversales cerca de la corteza, responden a un diagrama similar al de (fig. 14) pero invertido; c) el gradiente del diagrama de tensiones tangenciales está indicando la presencia de tensiones radiales contenidas en planos horizontales, en la superficie exterior del tronco estas tensiones radiales son nulas. En consecuencia, el trozo tiene inicialmente una considerable cantidad de energía elástica almacenada, la que al liberarse debido al fraccionamiento del tronco modifican su esquema de distribución –se transforma en energía de deformación de nuevos volúmenes– o se convierte en energía superficial de las nuevas áreas que aparecen al fisurarse la madera.

En consecuencia, el procesamiento del árbol para su comercialización –la obtención de trozas–, modifica la distribución inicial de tensiones (estado de coacción) existente en su madera y se pueden producir liberaciones bruscas de la energía elástica almacenada cuando se produce la aparición de fisuras.



Una vez derribado el árbol, las trozas que se obtienen están libres de cargas, excepto la despreciable de su peso propio pero, por todo lo visto, está sometido a un considerable estado tensional autoequilibrado –tensiones de coacción–. Este campo de tensiones residuales es prácticamente igual al originado por las tensiones de crecimiento en el árbol en cuestión, excepto en las nuevas superficies originadas, fundamentalmente los extremos, donde la creación de superficies libres intensifica las tensiones tangenciales, incrementando las tracciones en el centro y las compresiones en la periferia. En muchos casos estas tensiones transversales producen pequeñas fisuras en las inmediaciones de la médula, las que pueden transformarse luego en un conjunto más o menos numeroso de fisuras radiales (fig. 22). Que ello se produzca o no depende del balance entre la energía elástica liberada al abrirse la fisura y la energía superficial requerida por las nuevas áreas que se forman<sup>16</sup> al crecer las fisuras. Estas fisuras están más abiertas en el centro y se cierran al acercarse a la periferia, en el punto en que se alcanza el estado de equilibrio tensional planteado por la fractomecánica.

#### 4. Sobre las Aplicaciones Estructurales de la Madera

Las aplicaciones estructurales de la madera requieren de una teoría específica que permita construir los *Modelos Matemáticos* que posibiliten comprender y prever su comportamiento mecánico bajo diferentes circunstancias, como ocurre

<sup>16</sup> El proceso puede ser explicado en base a la Teoría de Griffith de rotura frágil.

con cualquier otro material que se pretenda utilizar a tales efectos. Estas teorías se ocupan de la *Resistencia de los Cuerpos Materiales* y, en principio, debiera existir una Teoría específica para grupo de materiales con comportamiento mecánico asimilable. En consecuencia, en las presentes circunstancias lo que hay que establecer es la ***Resistencia de los Cuerpos Materiales de Madera***, a la que denominaremos, por simplicidad, *Resistencia de Materiales de la Madera*.

Desde el punto de vista epistemológico se trata de una Teoría de tipo hipotético-deductiva, cuyas hipótesis básicas van a surgir de los *fenómenos físicos observables*<sup>17</sup> concernientes al comportamiento resistente de los cuerpos de madera, es decir, de la investigación científica y de la experiencia con estructuras ya construidas, y cuya parte deductiva se apoyará en la matemática. En consecuencia, estas hipótesis básicas se van a obtener, fundamentalmente, de los resultados de ensayos de laboratorio y, en forma complementaria, de la experiencia de obra. Para este último aporte van a ser de gran importancia las enseñanzas que surjan de las inspecciones oculares periódicas y de las tareas de reparación y mantenimiento de obras existentes.

## 5. Propiedades Mecánicas de la Madera

### 5.1. Algunos Datos Básicos

En el presente apartado se resumen, antes de decidir cuál será el conjunto de *hipótesis básicas* que fundamentarán la Resistencia de Materiales de los Cuerpos de Madera y a fin de justificar tal decisión, algunas de las principales características mecánicas de dichos cuerpos. En otras palabras, vamos a consignar algunas características básicas de los *cuerpos de madera* y a describir cómo reaccionan cuando son sometidos a la acción de cargas externas, a las consecuencias del transcurso del tiempo y a los ataques del medio ambiente.

a) Densidad. Todas las propiedades mecánicas de las maderas están estrechamente vinculadas a su densidad. Ahora, frente a un cuerpo de madera dado se tiene que el mínimo valor de la densidad corresponde a la madera seca y el máximo a la completamente saturada. En el Cuadro 3, que se incluye a continuación, se indican las densidades *seca*<sup>18</sup> y *verde* (recién cortada del árbol) de un conjunto de especies de utilización generalizada en la construcción de elementos resistentes, también se indica el módulo de elasticidad seco  $E_{ws}$ . Por su parte, las paredes sólidas y secas de las células de la madera tienen una densidad del orden de 1500 (Kg/ m<sup>3</sup>) con muy poca variación entre las diferentes especies, de lo que surge que la densidad es, en cada una de ellas, una medida

---

<sup>17</sup> Muchos de los cuales se expone en el presente texto,

<sup>18</sup> Con un contenido de agua del 12%.

de la porosidad. En líneas generales se puede estimar que, dentro de las maderas de empleo frecuente, la *densidad seca* de las duras está en el orden de 600 (Kg/m<sup>3</sup>) y la de las blandas de 400 (Kg/m<sup>3</sup>).

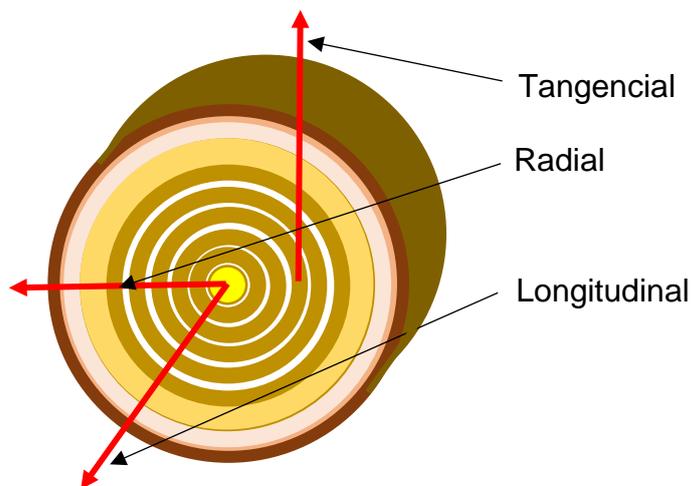
**CUADRO 3:** Densidad y Módulo de Elasticidad seco de algunas maderas

	Especie	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		Módulo de Elasticidad Seco (12% de agua) E <sub>ws</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )
		12% agua	verde	
MADERA DURA	Olmo	500	460	76.500
	Nogal	660	600	119.300
	Arce	540	490	113.100
	Roble	680	600	122.800
MADERA BLANDA	Abeto	480	450	134.500
	Cedro	320	310	76.600
	Pino	350	340	85.500

b) Límite de Elasticidad. Las maderas poseen comportamiento elástico<sup>19</sup> en un cierto rango de la carga aplicada, el que en general oscila entre 0,5 y 0,7 de la correspondiente carga de rotura. A estos valores máximos del comportamiento elástico se los denomina *Límite de Elasticidad* de la madera ( $f_{we}$ ) y, por debajo de ellos, las cargas producen deformaciones que son totalmente recuperables. En las maderas se pueden definir tres (3) Módulos de Elasticidad diferentes, que corresponden a tres (3) direcciones del tronco no coplanares (fig. 15): 1) Módulo de Elasticidad Longitudinal ( $E_{wL}$ ); 2) Módulo de Elasticidad Radial ( $E_{wR}$ ); 3) Módulo de Elasticidad Tangencial ( $E_{wT}$ ). El primero de ellos ( $E_{wL}$ ) es el de mayor valor y los dos restantes tienen valores bastante menores. La relación de ( $E_{wL}$ ) con ( $E_{wR}$  y  $E_{wT}$ ) varía según el tipo de madera y vale, por ejemplo: 67 para la madera balsa y 5 para la madera de cerezo. Para una misma especie, a mayor contenido de agua los Módulos de Elasticidad decrecen y aumentan al aumentar la densidad. En el Cuadro 3 se indican los Módulos de Elasticidad Longitudinales de varias maderas de uso común. El valor de  $E_{wL}$  de la madera dura seca es del orden de 10% mayor que cuando está verde, mientras que en las blandas esta diferencia es del orden del 4%.

Superado el Límite de Elasticidad, los cuerpos de madera comienzan a tener deformaciones irreversibles debido a que las fibrillas de celulosa de las paredes celulares comienzan a modificar su dirección tendiendo a ponerse paralelas al eje de crecimiento.

<sup>19</sup> Lo que significa que todo el trabajo que se entrega para deformarlas se recupera al retirar las cargas actuantes.



**Figura 15**

c) Grado de Heterogeneidad. La relación entre la resistencia a esfuerzos normales de tracción o compresión según las fibras –o resistencia longitudinal– y la perpendicular a esta –o resistencia transversal– puede llegar a 20 o más según el tipo de madera de que se trate. Según se puede observar en el Cuadro 2, esta relación es del orden de (1/20) para la resistencia a tracción, variando entre (1/35) y (1/12) y de (1/8) para solicitaciones de compresión, variando entre (1/11) y (1/5). Bajo una compresión perpendicular a las fibras, se rompen las células tubulares con una carga del orden 0,05 de la de rotura longitudinal, pero lo que queda no desaparece y, luego de deformaciones significativas, sigue resistiendo. Hay una especie de *comportamiento plástico*.

d) Corte. La sollicitación de corte origina compresiones perpendiculares a las fibras y efectos de deslizamiento relativos paralelos a ellas, estos son los hechos que define el valor de la resistencia a corte que, como se puede observar en el Cuadro 2, tiene valores similares a los de compresión radial.

e) Efecto de las altas temperaturas. Para temperaturas menores a 100°C las resistencias prácticamente no cambian.

f) Efecto del contenido de agua. El Contenido de agua de la madera se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de agua} = [(g_{wh} - g_{ws}) / g_{ws}] \times 100$$

Donde:

$g_{ws}$  = peso de la madera seca a peso constante

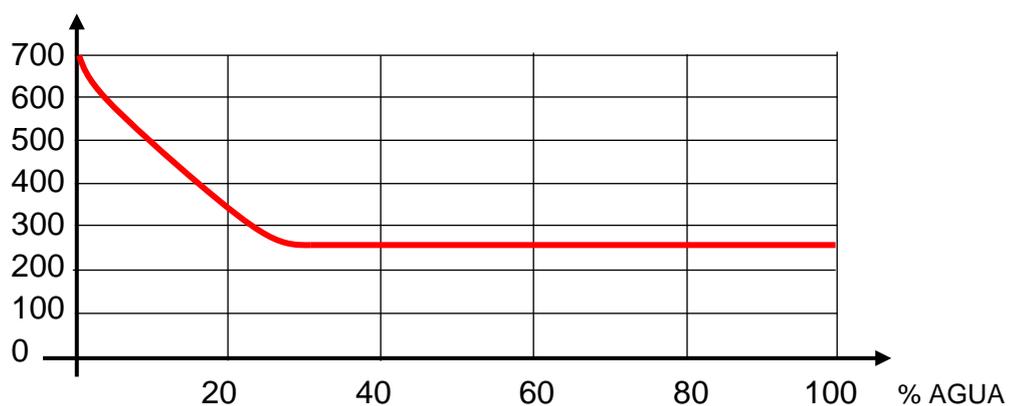
$g_{wh}$  = peso de la madera húmeda

El contenido de agua de la madera incide fuertemente en muchas de sus propiedades y, para fijar un punto de referencia general, se define como “madera seca” la que contiene un 12% de agua, que corresponde a una humedad relativa ambiente del 65%, si esta última aumenta, el contenido de humedad de la madera también va a aumentar, por lo que el lugar de emplazamiento de una construcción de madera tiene influencia considerable sobre sus propiedades mecánicas.

En las maderas el agua está tanto en las celdas huecas como en los vasos, lugares en los que no está retenida firmemente, y en las paredes celulósicas de las células, donde está más fuertemente unida a las fibrillas de celulosa. A medida que se desarrolla el proceso de secado de la madera se tienen dos etapas: 1) hasta aproximadamente el 30% de contenido de agua, se va eliminando la almacenada en vasos y traqueidas; 2) más allá de este valor, comienza a eliminarse la contenida en las paredes de las células.

Las características resistentes de las maderas dependen de su densidad, la que a su vez depende del tipo de madera y del contenido de agua. En un ensayo de compresión simple (fig. 16), la disminución de agua en los límites de la primera etapa no afecta la resistencia, mientras que durante la segunda hay pérdida de agua de las celdas de celulosa, lo que permite que la fibras se acerquen unas a otras aumentando la unión entre ellas y la densidad de la madera y, consecuentemente, aumenta la resistencia a compresión simple paralela y la rigidez pudiendo llegarse, para madera secada en estufa a peso constante, a incrementos de hasta 150%.

COMPRESIÓN PARALELA (Kg/cm<sup>2</sup>)



**Figura 16**

En el caso de las sollicitaciones de tracción, dado el mecanismo de rotura diferente que se pone en juego, el efecto es considerablemente menor: entre el 40% y el 60%.

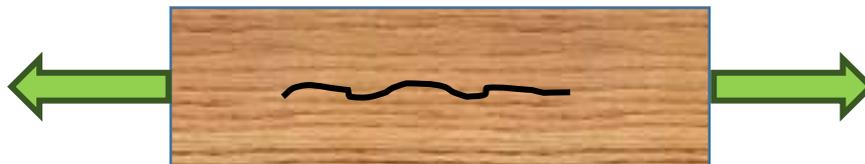
## 5.2. Características salientes del trabajo estructural de la madera

Del análisis de los resultados experimentales concernientes a las características resistentes de los cuerpos de madera<sup>20</sup>, surgen las siguientes pautas que gobiernan a nivel<sup>21</sup> ingenieril su comportamiento bajo carga.

A partir de ello se encuentra que los cuerpos de madera pueden considerarse:

- 1) **Continuos**: en el sentido de que son capaces de contener en su masa trayectorias continuas<sup>22</sup> de fuerzas, lo que significa que tienen *continuidad mecánica* (o resistente). Esto implica descartar, para el uso estructural, los cuerpos de madera con fisuras que imposibilitan esta continuidad en la transmisión de cargas o la alteran sensiblemente (fig. 17).
- 2) Poseen una bien definida **Anisotropía** lo que permite definir en ellos, en forma genérica, tres (3) direcciones principales no coplanares con comportamiento mecánico propio (fig.15): a) paralela a las fibras, que corresponde a la dirección longitudinal del tronco; b) radial, que pasa por el eje de crecimiento; c) tangencial, o sea, tangente a los círculos de crecimiento;

a) Fisura aceptable



b) Fisura inaceptable



Figura 17

- 3) Son **Heterogéneos** de heterogeneidad variable y, en tal sentido, se los puede *idealizar* suponiéndolos constituidos por una matriz sensiblemente homogénea y anisótropa, excluyendo la zona ocupada por la médula, y de

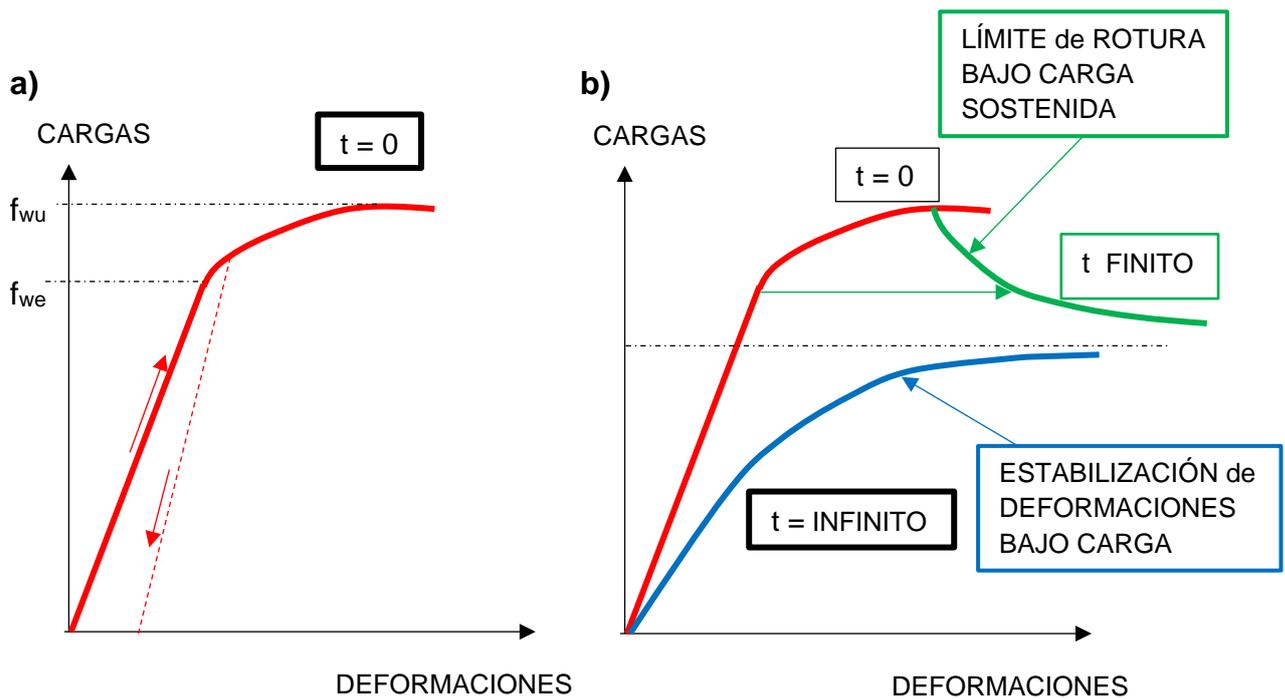
<sup>20</sup> Realizado sin considerar los efectos del tiempo, es decir, en forma sincrónica. Dichos efectos se consideran a posteriori en forma independiente y luego se combinan ambos resultados.

<sup>21</sup> El nivel de observación en que se efectúa el análisis depende de la configuración interna del material que se tome en cuenta (átomos, moléculas, etc.)

<sup>22</sup> Se trata de una continuidad Mecánica y no forzosamente Física. O sea, que se pueden admitir fisuras en los elementos estructurales de madera, pero no cualquier tipo de fisura.

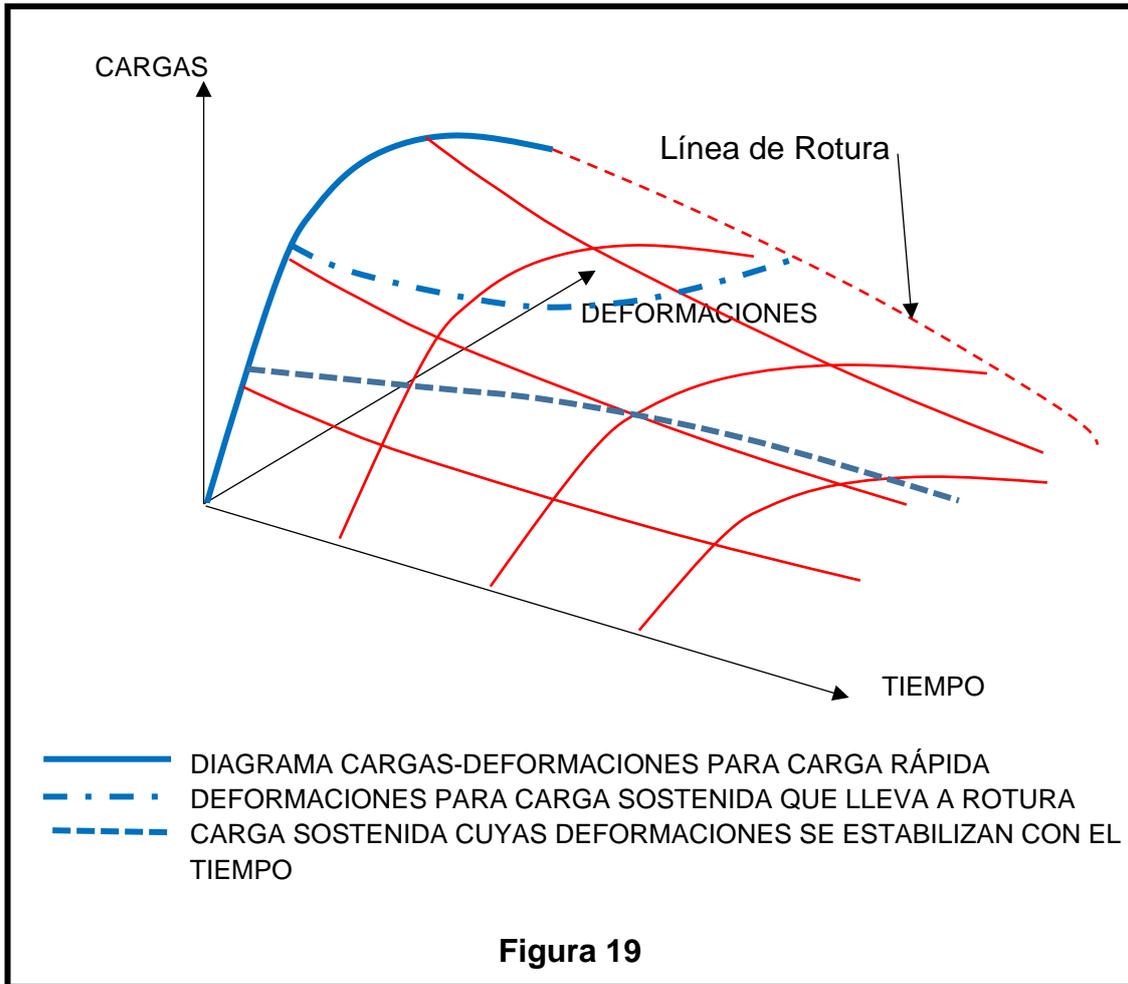
una clase de *heterogeneidad* consistente en pequeñas zonas, prácticamente puntuales, principalmente los *nudos*, con propiedades mecánicas diferentes a las de la matriz de base.

- 4) Con una **Relación Cargas-deformaciones** que, en principio para cualquier tipo de sollicitación, posee un tramo inicial lineal-elástico, que se extiende hasta el *Límite de Elasticidad* ( $f_{we}$ ) y luego uno curvo de tipo elasto-plástico (hay que definir experimentalmente las componentes elástica y plástica de este comportamiento mecánico) (fig. 18.a), incluida la rama descendente del diagrama, que corresponde a deformaciones mayores que la de la carga máxima.



**Figura 18**

Por simplicidad operativa, como se hace al considerar otros materiales, se puede trabajar en base a un *análisis estructural sincrónico* –Resistencia de Materiales Específica– y luego considerar la acción del tiempo mediante un *análisis estructural diacrónico*, basado en el comportamiento reológico del material, que modifica los resultados anteriores (fig. 18.b) y que se considera en el apartado 8, siguiente. La superficie de (fig. 19), una especie de paraboloides hiperbólico, permite una buena visualización de la variación de la deformabilidad de un elemento cargado, y su eventual rotura, en función de la duración de la carga.



El comportamiento lineal elástico de un material para un determinado rango de carga, permite suponer con suficiente aproximación que, dentro del mismo, las secciones planas de un cuerpo descargado se van a mantener planas mientras las sollicitaciones no hagan que se supere dicho rango de cargas.

Lo que queda por averiguar experimentalmente es sí, superada la tensión correspondiente al límite de elasticidad ( $f_{we}$ ) en un determinado valor ( $\Delta\sigma_1$ ) y frente a la aparición de deformaciones permanentes, luego de un cierto número de repeticiones de cargas que alcancen este valor ( $f_{we} + \Delta\sigma_1$ ) dejan de acumularse deformaciones permanentes, es decir, se llega a un valor:

$$\sum \varepsilon_{wp} = \text{constante}$$

Y, más allá de tener esta deformación permanente en consideración, el cuerpo lleva su nuevo límite elástico hasta ( $f_{we2} = f_{we} + \Delta\sigma_1$ ) con el mismo módulo de elasticidad inicial ( $E_w$ )<sup>23</sup> o uno muy similar.

<sup>23</sup> Esto es lo que ocurre, por ejemplo, en los cuerpos de hormigón.

## 6. Defectos de la Madera que afectan su trabajo mecánico

Las propiedades mecánicas de la madera, correspondientes a la etapa de su procesamiento en la que ya está en condiciones de ser utilizada en forma de cuerpos resistentes –por ejemplo, tablas y tirantes–, son afectadas por distintos tipos de defectos que surgen, principalmente, de dos tiempos diferentes de su existencia: los *defectos naturales*, que ya existen en el tronco del árbol y que se originan durante su crecimiento y desarrollo, los que en alguna medida pueden ser limitados por una adecuada política de poda sistemática durante el mismo; y los *defectos debidos a la acción humana*, los que aparecen durante el proceso técnico que conduce desde el tronco en el árbol hasta el producto que se pone a disposición del constructor.

### 6.1. Defectos Naturales

Los defectos naturales de mayor incidencia en la capacidad resistente de las maderas ya industrializadas, pueden agruparse en dos categorías principales: *fisuras internas* y *alteraciones localizadas del tejido celular*. De estas últimas nos ocuparemos en el presente punto, los efectos mecánicos de las primeras los incluiremos en el siguiente pues son similares a los allí descriptos.

Dentro de las *alteraciones localizadas del tejido celular* se pueden tener, en las maderas duras, depósitos de sustancias cristalinas que originan pequeños núcleos de gran dureza, en las maderas blandas, bolsones de resina que generan cavidades no resistentes y, en ambas, nudos. Dado que los *nudos* son los defectos netamente preponderantes, dedicaremos este apartado a su estudio. Los efectos mecánicos de los dos primeros se pueden analizar de una u otra de las formas en que se lo hace con los nudos.

**6.1.1) Nudos.** Los *nudos* están constituidos por un conjunto de tejido leñoso que una rama inserta en un tronco, es el defecto más común de la madera y, en alguna medida, se lo puede controlar con un adecuado plan de poda sistemática durante su crecimiento. Desde el punto de vista resistente existen nudos adheridos al tronco, cuya madera es más oscura y están más endurecidos, a los que denominaremos *nudos adherentes* y otros que están despegados del resto del tronco y se salen al menor golpe, a los que se conoce como *nudos saledizos*. Los *nudos* inciden desfavorablemente en todas las propiedades mecánicas, pues introducen en la madera heterogeneidades que originan concentraciones de tensiones, sea en ellos, sea en la madera de su entorno. Esto se debe tanto a la interrupción de la continuidad de las fibras del tronco, en algunos casos, cuanto a la pérdida de su paralelismo en la gran mayoría de ellos. El problema se manifiesta cuando, una vez actuando las cargas externas, las fibras se transforman en líneas de fuerza. La influencia de los nudos en la resistencia de un cuerpo puede ser grande o pequeña según su tamaño, distribución y cantidad.

Desde el punto de vista resistente, la presencia de nudos en una escuadría tiene efectos de dos tipos: la modificación de la sección resistente y la pérdida del paralelismo de las fibras.

Respecto de la modificación de las secciones resistentes, la existencia de *nudos saledizos* tiene una consecuencia inmediata: la reducción de la sección de carga (figs. 20.b y 20.c) y, por consiguiente, la disminución de su capacidad portante. Por el contrario, el efecto de los *nudos adherentes*, menos deformables que la madera de su entorno, va a atraer hacia sí mayores cargas lo que equivale a un incremento de la sección, lo que resulta muy evidente en el caso de las solicitaciones normales de tracción y compresión (fig.20.a). En efecto, si una sollicitación normal representa el acortamiento “uniforme”<sup>24</sup> de todo el elemento cargado, esto implica que el nudo y la madera circundante se deforman lo mismo. Como en régimen elástico el nudo es menos deformable que la madera  $-E_{\text{nudo}} > E_w-$ , en las condiciones planteadas va a tomar más carga, por lo que la ecuación de equilibrio de fuerzas va a ser la siguiente:

$$N = A_w \times \sigma_w + A_{\text{nudo}} \times \sigma_{\text{nudo}} = A_w \times \varepsilon_w \times E_w + A_{\text{nudo}} \times \varepsilon_{\text{nudo}} \times E_{\text{nudo}}$$

Dado que  $(\varepsilon_w = \varepsilon_{\text{nudo}} = \varepsilon)$ , la ecuación de equilibrio se puede escribir, homogeneizando la sección como si fuera toda de madera (sin nudo):

$$N = \sigma_w \cdot [A_w + A_{\text{nudo}} \cdot (E_{\text{nudo}} / E_w)] = \sigma_w \cdot (A_w + A_{\text{nudo}} \cdot n) = \sigma_w \cdot (A_{\text{wh}})$$

Donde:

$$n = \text{coeficiente de homogeneización} = (E_{\text{nudo}} / E_w) > 1$$

$$A_{\text{wh}} = \text{sección de madera homogeneizada} = (A_w + A_{\text{nudo}} \cdot n)$$

Con lo que queda demostrado que el área de la sección resistente, homogeneizada como si toda ella tuviera las características de la madera, es mayor que el área real de la sección cargada, por lo que resiste más.

Las situaciones analizadas de desvío de las líneas de fuerza internas de la madera por causa de los nudos, saledizos o adherentes, tienden a generar zonas traccionadas, y eventualmente fisuras en planos paralelos a la dirección de la carga aplicada (fig. 20); estas no van a alterar mayormente la transmisión interna de fuerzas siempre que no se superen ciertos límites.

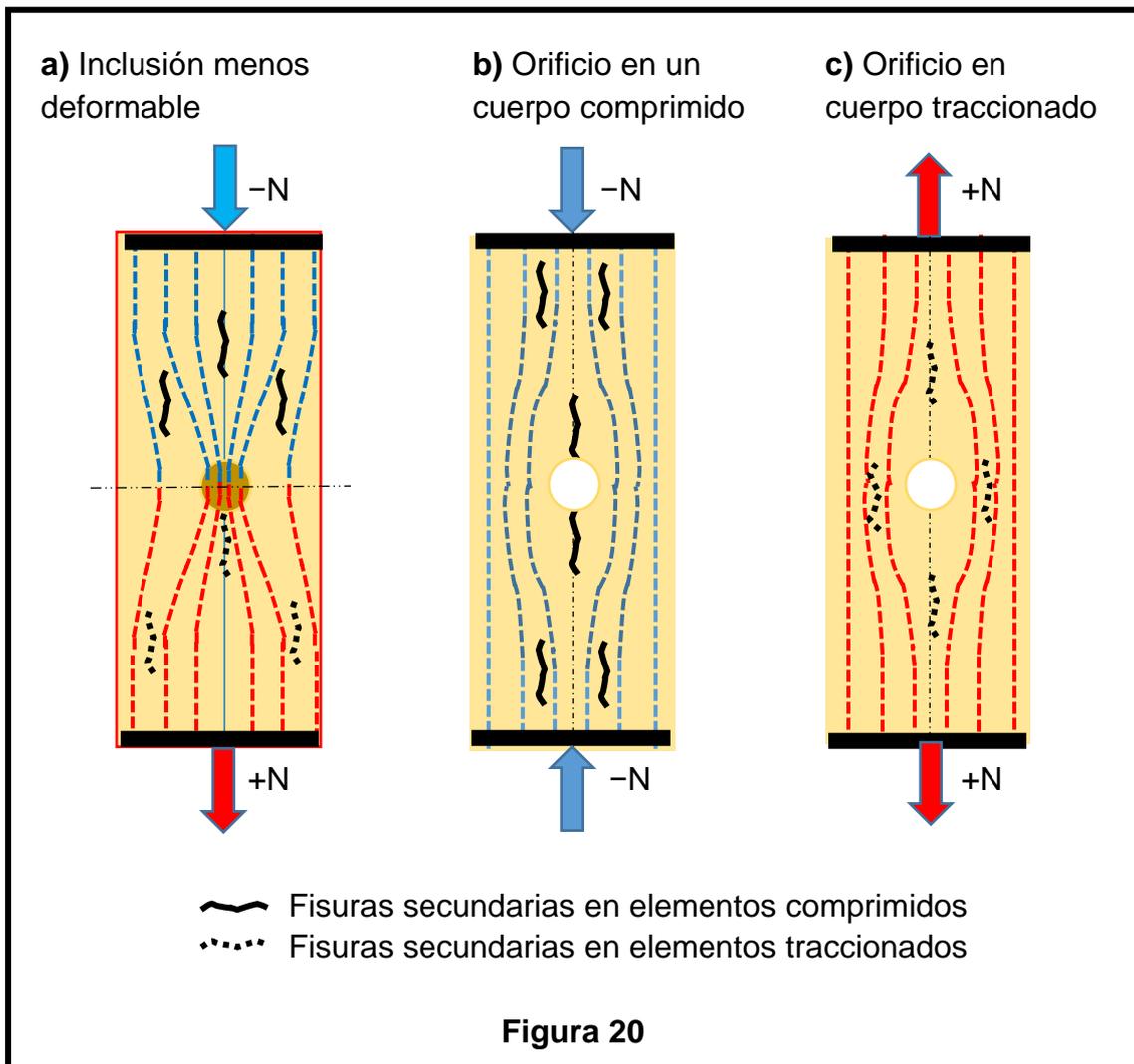
**6.1.2. Cambio de dirección de las fibras.** Como vimos, los cambios de dirección de las fibras se producen cuando estas se encuentran con nudos del tronco, la influencia de estas desviaciones origina tracciones paralelas a las fibras, que la

---

<sup>24</sup> Dos secciones contiguas inicialmente paralelas se mantienen paralelas luego de cargar la pieza.

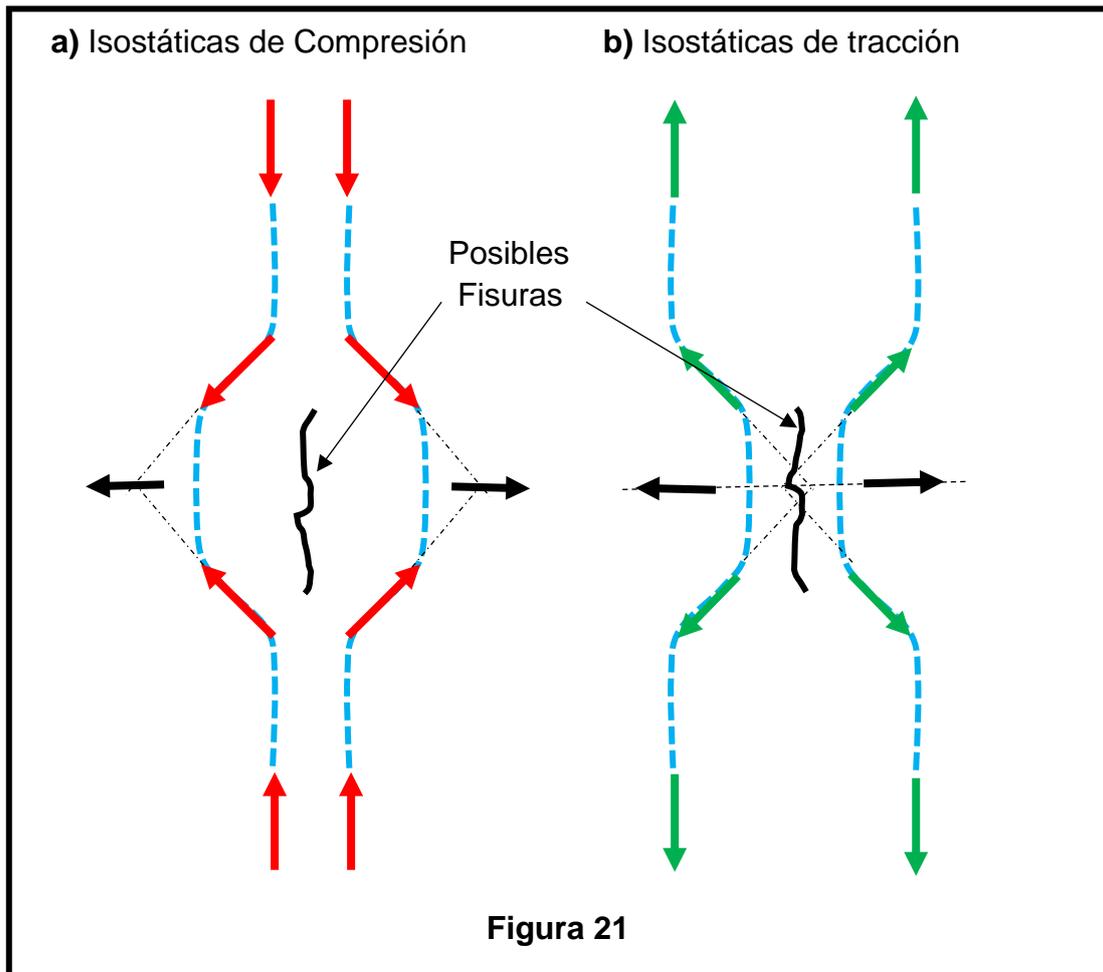
madera resiste mal, y que pueden dar origen al tipo de fisuras que se indica en (fig. 20).

El concepto básico de estos comportamientos bajo carga se apoya en que, cuando dos (2) líneas de fuerza de compresión vecinas y en general paralelas entre sí, se separan transformándose en convexas (fig.21.a), generan un campo de tracciones perpendiculares a ellas, es decir, actuando sobre un plano paralelo a las mismas. Estas tracciones “secundarias” que se producen en los elementos comprimidos, pueden originar una fisura paralela a la dirección general de las líneas de fuerza si el esfuerzo es suficientemente grande (figs. 20.a, mitad superior, y 20.b).



En el caso de las líneas de fuerza de tracción (fig. 21.b), el campo de esfuerzos de tracción secundarios, actuando también sobre planos paralelos a ellas, y la eventual fisura, se originan cuando dos líneas de fuerza vecinas son convexas (figs. 20.a, mitad inferior, y 20.c).

En conclusión, cualquier alteración en un campo de fuerzas paralelas entre sí, tanto de compresión como de tracción, origina esfuerzos normales en planos paralelos a la dirección original de las líneas del campo de fuerzas. Estos esfuerzos son tanto de tracción como de compresión, pero solo nos hemos ocupado de los primeros pues son los que pueden originar fisuras en el cuerpo de madera cargado<sup>25</sup>. Por supuesto que estas fisuras no van a producirse todas, al aparecer la primera se libera parte de la energía almacenada y, en general, hay que aumentar bastante la sollicitación para que aparezcan otras.



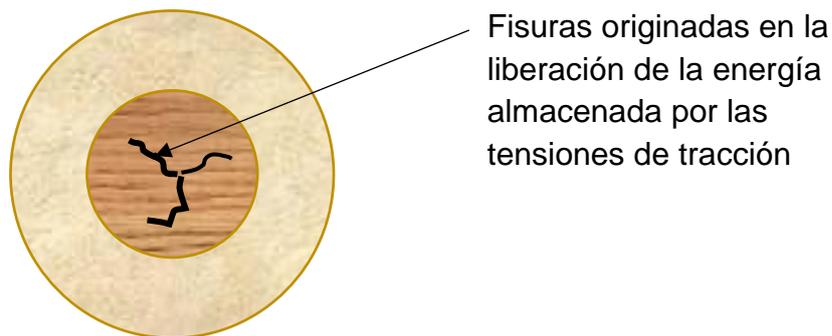
## 6.2. Defectos debidos a la acción humana

Estos se producen principalmente durante el aserrado, la selección de cortes, el secado y el transporte:

**6.2.1. Rajaduras y Grietas filiformes.** Como ya se explicó en el apartado 3 precedente, la industrialización del árbol para su posterior comercialización—las

<sup>25</sup> Esto se apoya en la desigualdad de la resistencia de la madera en planos paralelos a las fibras, siendo la de tracción bastante menor que la de compresión y, además, mucho menos confiable.

acciones de cortar el tronco de distintas formas-, modifica la distribución inicial de tensiones (estado de coacción) existente en su tronco. Esto ocurre principalmente en las nuevas superficies que se crean: en una primera etapa, al derribar el árbol, en los extremos de las trozas y luego, al aserrar estas, en las caras de las escuadrías que se obtienen. En ambos casos se produce liberación de la energía elástica que estaba almacenada en el árbol, lo que produce, también en ambos casos, rajaduras en los extremos (fig. 22) –contenidas en planos perpendiculares a la dirección de las fibras– y fisuras filiformes en las caras paralelas a ellas.



**Figura 22**

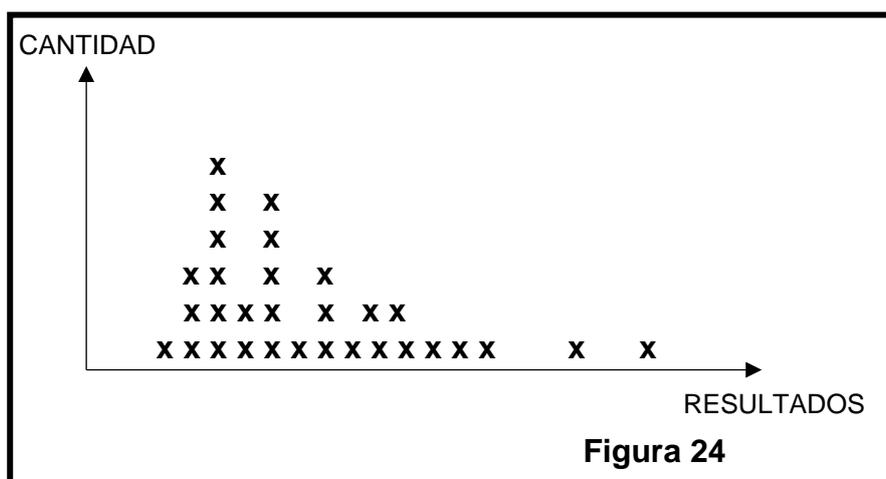
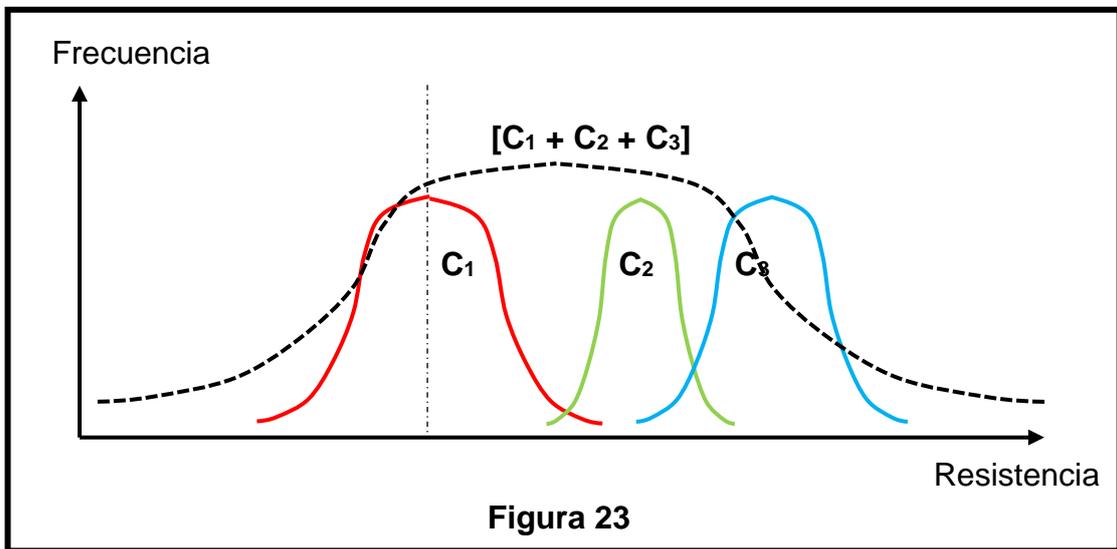
## **7. Dispersión en los Resultados**

### **7.1. Dispersión propia del cuerpo material y dispersión generada por errores de procedimiento**

Los resultados de los ensayos realizados sobre elementos de madera presentan siempre un considerable grado de dispersión, aun cuando se hayan tomado todas las precauciones posibles para que las probetas que se ensayan y los procedimientos que se aplican sean siempre los mismos. Esto constituye un dato de la realidad que no se puede ignorar ni soslayar y que es necesario cuantificar pues va a incidir en los procedimientos de cálculo. En consecuencia, hay que tener mucho cuidado en la realización de los ensayos de laboratorio para no sumar a aquella dispersión natural de resultados, cuyas características interesa conocer con precisión, los propios de una metodología de trabajo aplicada sin el rigor adecuado.

Esto, por un lado. Obliga a tratar estadísticamente los resultados experimentales obtenidos y, por otro, a tener bien en claro cómo se lo debe hacer. Por ejemplo, supongamos un conjunto de ensayos realizados aplicando procedimientos iguales y ejecutados sobre probetas también iguales, ello dará origen a un conjunto  $[C_1]$  de resultados cuya curva de distribución estadística es la indicada como  $(C_1)$  en (fig. 23). Si repetimos los ensayos modificando una o más de las

características de las probetas o de la metodología o del tipo de sollicitación aplicadas, se obtendrán las curvas de distribución ( $C_2$ ) y ( $C_3$ ) de dicha figura. En ensayos bien realizados, estas curvas ( $C_1$ ), ( $C_2$ ) y ( $C_3$ ) contienen buena cantidad de información sobre el comportamiento experimental de los cuerpos de madera y sobre la dispersión de resultados que se puede esperar en la práctica para cada pieza y para cada tipo de sollicitación. Además, toda esta información, contenida en buena medida en las curvas de distribución estadísticas, será de utilidad en el ajuste de una teoría que represente la resistencia de los cuerpos de madera. Lo que no debe hacerse nunca es un análisis estadístico de conjunto de resultados obtenidos en más de un ensayo en los que las variables que se estudian son diferentes, se estarían mezclando poblaciones no compatibles y el resultado sería una curva como la ( $C_1+C_2+C_3$ ) de (fig. 23), que indica una dispersión de resultados que no tiene nada que ver con la realidad resistente del material estudiado.



En este aspecto, se haga o no un análisis estadístico de los resultados obtenidos, siempre es conveniente volcar estos en un gráfico como el de (fig. 24), pues se puede obtener de ellos mucha información significativa.

## 7.2. Acerca de la representatividad de las probetas

La dispersión de los datos de resistencia obtenidos del ensayo de probetas iguales ensayadas de la misma forma es significativa. Si a esto le agregamos la diversidad de maderas que se utilizan en la construcción y lo dicho al comienzo de este texto: “el comportamiento resistente de la madera puede variar drásticamente entre los individuos de una misma especie o, aún, entre distintas zonas del mismo individuo, resulta evidente que, para encarar una obra de madera, una vez adquirido el material hay que caracterizarlo mediante la realización de uno o más ensayos de rutina. Por otra parte, para el estudio experimental de la madera, es decir, para obtener los *datos de la realidad* que permitan esbozar una teoría que represente su comportamiento, se deben realizar innumerables ensayos de laboratorio que luego, al plantear la teoría, se relacionarán con los de rutina. Todos estos ensayos, los de rutina y los científicos, se ejecutan cargando probetas, que son cuerpos materiales que resultan aptos para poner en evidencia las características resistentes del material en los diferentes casos particulares que se estudien. Evidentemente, en función del dato que se quiera obtener se elegirá en cada caso una probeta adecuada y una metodología pertinente que permitan ponerlo de manifiesto con la menor cantidad posible de incertidumbre. Caso contrario puede que no se sepa qué se midió, situación, esta última, más común que lo esperable y deseable, sobre todo en la presente especialidad.

Un caso paradigmático lo constituyen los ensayos de compresión, sobre todo si se pretende medir la resistencia a compresión pura, cosa que es prácticamente imposible. Ello se debe a que, si bien el eje geométrico de un cuerpo de ensayo prismático –la línea que une los centros geométricos de todas sus secciones rectas– puede suponerse recto sin introducir errores de consideración, para tener compresión pura hay que centrar la carga en el eje mecánico –curva que une los puntos de aplicación de la resultante interna originada, en todas sus secciones, por un acortamiento uniforme– y este no existe pues, debido a la ligera heterogeneidad del material<sup>26</sup>, el punto de aplicación de la resultante interna va a variar de sección en sección manteniéndose en un entorno<sup>27</sup> del eje geométrico. En la práctica se puede centrar la carga en el eje geométrico con suficiente aproximación, si se procede cuidadosamente, pero no se la puede centrar en el mecánico pues, como vimos, este no es un eje sino una curva espacial. En conclusión, los denominados “ensayos de compresión” son en realidad ensayos de *flexión compuesta* con pequeña excentricidad. En general, se puede aproximar a la compresión pura, sin alcanzarla nunca, aumentando el

---

<sup>26</sup> Incluso evitando tener defectos en la probeta que se ensaya y pese a la hipótesis aproximada de homogeneidad que se hace.

<sup>27</sup> La dimensión de este entorno va a depender de la calidad de la madera.

área de las secciones transversales del cuerpo de ensayo<sup>28</sup>. Pero evidentemente esto también tiene un límite. En conclusión, no estamos diciendo que no se hagan ensayos de compresión<sup>29</sup>, lo que decimos es que hay que tener en claro qué representan los resultados que se obtengan de los mismos –si están bien planeados y ejecutados siempre representan la realidad, lo que constituye en sí un dato no desdeñable– y actuar en consecuencia.

Más complejo es ensayar a compresión piezas esbeltas pues estas en general pandean, principalmente por los problemas que terminamos de exponer y, si se intenta impedir que se produzca este fenómeno por algún medio, lo que en realidad se hace es introducir fuerzas perpendiculares a la línea de carga, con lo que el ensayo deja de ser de compresión para transformarse en una mera relación probeta-máquina sin gran valor.

Para terminar con nuestro análisis de los ensayos de Laboratorio más comunes, es conveniente que los ensayos de flexión tengan una zona sometida a *flexión pura*, flexión sin corte, de modo de minimizar la influencia de defectos puntuales. Por ejemplo, es el caso de la viga con cuatro (4) cargas: dos (2) cargas activas aplicadas en los tercios de la luz y dos (2) cargas reactivas aplicadas en los extremos, en los cuales el tercio central de la probeta está sometida a flexión pura.

Hasta acá nos hemos referido a las probetas utilizada en ensayos de Laboratorio que se emplean en el desarrollo de líneas de investigación, nos toca ahora ocuparnos del Constructor de obras que quiere evaluar la resistencia de la madera que ha adquirido. En tal sentido, para poder caracterizar una madera que se desee utilizar en una determinada obra se deberá tener, en lo posible, un ensayo de rotura –o eventualmente un par de ellos– que sea sencillo y que se pueda repetir sin excesivas complicaciones ni pérdida de tiempo. Para los casos más complejos, como el comportamiento reológico, cuyos ensayos no son de rutina, habrá que buscar un procedimiento teórico de interpretación de estos fenómenos, que puede vincularse aceptablemente a las situaciones corrientes mediante el o los ensayos de rutina. Como complemento de estos Ensayos de Rutina, se debería realizar siempre una evaluación visual del *grado de nudosidad* de las escuadrías disponibles.

---

<sup>28</sup> Pues el entorno de variación del punto de aplicación de la resultante es una propiedad del tipo de madera más que del tamaño de la probeta

<sup>29</sup> Que son de los más simples de realizar, sobre todo en ensayos de rutina.

## 8. Comportamiento Reológico de la Madera

El *comportamiento reológico* de un cuerpo material implica la modificación de su relación [tensiones internas-deformaciones] con el transcurso del tiempo (figs. 18 y 19) bajo carga constante. Si el cuerpo es libremente deformable, el comportamiento reológico implica el cambio de su estado de deformación, es decir, la variación que vayan a sufrir sus dimensiones externas sin que se modifique el sistema de cargas actuante. Esto puede ocurrir con el cuerpo descargado, y se denomina *retracción* si la o las dimensiones disminuyen con el transcurso del tiempo o *hinchamiento* si se incrementan, o actuando cargas sobre él y se tienen los fenómenos de *fluencia*. Si los cuerpos no son libremente deformables, el comportamiento reológico produce modificaciones en su estado tensional.

### 8.1. Retracción e hinchamiento

El factor que incide básicamente en la inestabilidad dimensional de un cuerpo de madera descargado, es la humedad que contiene dicho cuerpo en su interior, y ello depende de la humedad ambiente. Un aumento de humedad interna implica un aumento de las dimensiones del cuerpo, principalmente las transversales a la dirección de las fibras, y una disminución de la humedad interna induce una disminución de similares características. Si las condiciones de vínculo que posee el cuerpo impiden su libre deformación, lo que a este le va a ocurrir es que, respectivamente, se va a comprimir o traccionar por lo que, para evitar estos estados de carga no previstos y sus correspondientes estados de deformación, las construcciones de madera deben permitir a sus elementos componentes cierto margen de movimiento que posibilite los cambios dimensionales de origen reológico sin alterar su estado tensional. Naturalmente, estas especies de “juntas de dilatación” son tanto más importantes cuanto mayores sean las dimensiones de los elementos considerados.

### 8.2. Fluencia

Los cuerpos de madera sometidos a la acción de cargas externas sostenidas en el tiempo, sufren fenómenos de fluencia debido al desplazamiento que se produce entre sus largas cadenas moleculares y las paredes de las células. El fenómeno en sí es bastante complejo y acá solo indicaremos algunas de sus características más salientes:

- a) Los valores de las deformaciones de fluencia son tanto mayores cuanto mayores son las cargas, a igualdad de las restantes variables que puedan incidir, las principales de las cuales se comentan en los puntos c, d y e siguientes.
- b) En tales condiciones, la deformación de fluencia depende del tipo de madera de que se trate, de la geometría de la pieza y de las condiciones ambientales.

- c) A mayor humedad en la madera se tienen, para la misma carga, mayores deformaciones de fluencia.
- d) Un aumento de la temperatura del cuerpo de madera de 28°C, duplica o triplica las deformaciones de fluencia.
- e) La madera verde tiene deformaciones de fluencia de cuatro (4) a seis (6) veces mayores que la deformación inicial.
- f) Si la carga actuante es suficientemente grande, se produce la rotura por efectos de fluencia (fig. 18.b y 19), conocida como rotura bajo carga sostenida. Si bien este valor de la carga aplicada que después de un cierto tiempo actuando produce la rotura puede variar mucho de una especie a otra, en general se puede suponer que esto ocurre para valores de la carga actuante del orden del 70% de la carga de rotura en un ensayo rápido<sup>30</sup>, según la especie de que se trate y las circunstancias en que ello se produzca.
- g) Cambios en las condiciones ambientales reducen el tiempo de rotura bajo carga sostenida. La influencia aumenta si los cambios de temperatura y humedad son cíclicos.

## 9. El empleo de la madera en la construcción de estructuras resistentes

Cuando se piensa en el empleo de un determinado material para la construcción de estructuras resistentes, en este caso la madera, lo primero que hay que definir es qué tipo de prestaciones se esperan de él y que teorías o procedimientos de cálculo se podrán emplear en cada caso. En principio las prestaciones que ahora interesan se agrupan en por lo menos tres (3) categorías: **a)** comportamiento en servicio; **b)** resistencia a rotura o carga última admisible, en base a la cual se calcula la necesaria seguridad de la obra; y **c)** vida útil, es decir, durabilidad.

### 9.1. Comportamiento en Servicio

En este caso, el *comportamiento en servicio* se va a referir a las prestaciones, relacionadas con la resistencia que se esperan de la construcción en cuestión y a las consecuencias de este accionar resistente cuando se la utiliza en condiciones normales, es decir, en las condiciones previstas al calcularla. Esto implica que no nos ocuparemos de impermeabilidad, ni de aislación térmica, ni de acciones semejantes. Por ejemplo, lo que debe garantizar la estructura es que la construcción a la que da sostén no sea demasiado deformable, lo que se indica mediante *Estados Límites de Servicio* de Deformación—por ejemplo flechas máximas a admitir en los elemento flexionados—, ni que se produzcan vibraciones que afecten su habitabilidad y confort, lo que se indica mediante *Estados Límite de Servicio* de Vibraciones —por ejemplo, indicando las

---

<sup>30</sup> Sin influencia del tiempo.

frecuencias de vibración que no resulten molestas para los habitantes-. Es de esperar que estas cargas actúen un gran número de veces durante la vida útil de la construcción, lo que deberá tomarse en cuenta.

Dado que en servicio no se debieran admitir tensiones en la madera que superen su módulo de elasticidad, en estas condiciones se puede recurrir a la *Resistencia de Materiales Clásica*, o de base lineal elástica, con las adecuaciones del caso. Esta posibilidad tiene la gran ventaja de admitir la aplicación del *Principio de Superposición de Efectos* y demás ayudas de cálculo de dicha teoría.

## **9.2. Resistencia a Rotura**

Cuando se debe calcular la seguridad de una construcción, es necesario salir de la zona de comportamiento lineal elástico del material y penetrar en la de respuesta elasto-plástica en la cual deja de ser válida la Resistencia de Materiales Clásica y hay que recurrir a alguna teoría de base elasto-plástica. En este caso los estados de referencia para el cálculo de la seguridad de una estructura son los *Estados Límite Últimos* o *de Rotura* –rotura de sección, robustez, pandeo, etc.–.

## **9.3. Durabilidad**

Las construcciones civiles se proyectan para que puedan ser utilizadas durante un determinado lapso al que se denomina “vida útil”. Durante el mismo la capacidad resistente va disminuyendo, por el envejecimiento natural de los materiales y por el desgaste que origina el uso normal de la construcción, pero se debería poder terminar el período de *vida útil* sin necesidad de reforzar la estructura. De que esto efectivamente ocurra se ocupa la teoría sobre *Durabilidad* de los cuerpos de madera. En elementos bien concebidos y bien dimensionados, correctamente utilizados y sometidos a una adecuada política de mantenimiento periódico, es de esperar que la construcción se mantenga en servicio durante la *vida útil* prevista.

En los apartados anteriores hemos considerado los criterios adecuados de proyecto, dimensionamiento y uso. Aparte de esto, para tener la certeza de que la durabilidad sea la prevista es necesario poder conocer, con antelación suficiente, la aparición de cualquier tipo de anomalía que pueda deteriorar la madera. La forma de lograr esto consiste en aplicar a la construcción, durante toda su vida útil, una bien planificada política de *Inspecciones y Tareas de Mantenimiento Periódicos*. De estas inspecciones y mantenimientos periódicos surgirá, eventualmente, la necesidad de realizar tareas específicas de reparación y refuerzo. Con esta forma de proceder no debería haber ningún motivo para

que, en condiciones normales, la estructura queda fuera de servicio antes de finalizar su vida útil.

## SEGUNDA PARTE:

### Encuadre de una posible Teoría referida al Comportamiento Resistencia de los Cuerpos de Madera

#### 10. Diferentes Resistencias de los Cuerpos Materiales existentes

Para el establecimiento de una *Resistencia de Materiales Específica de la Madera*, se puede partir de uno de los modelos de esta ciencia ya existentes y luego incluir en él las particularidades del caso<sup>31</sup>. Todos ellos se refieren a materiales *continuos* desde el punto de vista resistente y con relaciones [cargas-deformaciones] obtenidas en forma experimental. Luego, las diferencias entre las hipótesis básicas de cada uno de ellos se van a centrar en las condiciones de *heterogeneidad* y *anisotropía*.

Hoy por hoy se pueden distinguir, por lo menos, tres (3) tipos paradigmáticos de Resistencias de Materiales Específicas:

- 1) *Materiales homogéneos e isótropos*, con propiedades mecánicas dadas y de validez universal, es fundamentalmente el caso del acero. Se trata de la que hoy se conoce como Resistencia de Materiales Clásica o, directamente, Resistencia de Materiales. Su aplicación práctica no requiere de ningún tipo de ensayos pues los cuerpos materiales básico empleados se producen en fábrica, tienen resistencias controladas y garantizadas y se trabaja en base a catálogos de validez universal. Solo se los ensaya si se desconoce el origen del material.
- 2) *Materiales con condiciones de heterogeneidad y anisotropía* impuestas en cada caso por el Proyectista, con propiedades mecánicas también impuestas por el Proyectista dentro de ciertos límites. El ejemplo más significativo es la Teoría del Hormigón Armado –o Resistencia de Materiales Específica de los Cuerpos de Hormigón Armado–, en la cual ocurre con las armaduras, que se compran perfiladas, lo mismo que en el caso anterior. Por el contrario el hormigón, que se fabrica específicamente para cada situación, requiere siempre ensayos de control.
- 3) *Materiales con condiciones de heterogeneidad y anisotropía* propias de ellos y, en primera instancia, inmodificables, lo mismo que sus propiedades mecánicas. El caso mejor conocido –y desarrollado– es el de la Mecánica de Suelos. En este grupo seguramente deberemos incluir la **Resistencia de Materiales Específica de la Madera**. En un futuro previsible, una vez que se tengan tipificadas las maderas de posible empleo estructural, tal vez solo

---

<sup>31</sup> Como ocurrió, en los orígenes del empleo estructural del Hormigón Armado a principios del siglo XX, con la Resistencia de Materiales Clásica

se requiera, al menos en los casos prácticos comunes, un *Análisis Visual* de defectos (nudosidad). Mientras esto ocurre va a ser necesario determinar, previamente al análisis visual, las cualidades resistentes básicas de la madera a utilizar, mediante el ensayo de probetas “libres de defectos”.

Al igual que ocurre en Mecánica de Suelos, para los análisis resistentes de los cuerpos de madera no se puede hacer un planteo general –como en el caso del acero–, sino que cada problema a encarar constituye un caso particular definido por dos (2) *parámetros básicos*<sup>32</sup>: a) la clase de madera, que define las *propiedades de la matriz homogénea* y que se determinan mediante el ensayo de probetas “sin defectos”; b) la *heterogeneidad*, definida en principio por la cantidad y distribución de nudos, fisuras, bolsones de resina, etc. Sería muy conveniente que esta última circunstancia, que debería definir los márgenes de seguridad a utilizar, pudiese determinarse mediante *análisis visual*, al menos en los casos prácticos corrientes. Más allá de ello los cuerpos de madera admiten, para interpretar su trabajo resistente en régimen elástico, una Resistencia de Materiales Específica que sea una adaptación adecuada de la Resistencia de Materiales Clásica, como se hace por ejemplo con los cuerpos de hormigón armado. A ella nos referiremos en la Tercera Parte del presente texto. Si esto fuese así, hay que tener presente que la Resistencia de Materiales Clásica y sus derivadas solo permiten analizar el trabajo estructural bajo cargas de servicio<sup>33</sup>. En consecuencia, para poder definir márgenes de seguridad habrá que elaborar alguna Teoría de la Rotura de las estructuras de madera.

Por simplicidad operativa, como se hace al considerar otros materiales, se puede trabajar en base a un *análisis estructural sincrónico* –Resistencia de Materiales Específica– y luego considerar la acción del tiempo mediante un *análisis estructural diacrónico*, basado en el comportamiento reológico del material, que modifica los resultados anteriores.

---

<sup>32</sup> La *anisotropía*, caracterizada por la dirección de las fibras, se tiene en cuenta principalmente al aserrar los troncos.

<sup>33</sup> Bajo cargas de servicio nunca se debe superar el límite de elasticidad.

## **TERCERA PARTE: Incógnitas y Conjeturas**

### **11. Objetivos**

En esta Tercera Parte se analizan los fundamentos probables de una Resistencia de Materiales de los Cuerpos de Madera, con el objetivo principal de que ella dé respuesta a cuestiones como las siguientes: a) prever comportamientos, es decir, conocer cómo van a resistir, o sea, qué modificaciones van a sufrir, los cuerpos de madera bajo las distintas sollicitaciones que puedan actuar sobre ellos; b) permitir una visión global de sus aptitudes resistentes, por ejemplo, mediante la construcción de sus Curvas de Resistencia Intrínseca; c) determinar su capacidad resistente última, para lo que se necesitará conocer las posibilidades de que se conformen rótulas plásticas, en qué circunstancias esto puede ocurrir y cuáles serían sus características; d) conocer la acción del tiempo sobre el comportamiento mecánico, o sea, poder determinar a priori cómo se van a alterar los datos incluidos en los puntos precedentes con el transcurso del tiempo.

Como ya hemos dicho, la teoría que nos proponemos desarrollar va a ser de tipo hipotético-deductiva, cuyas Hipótesis Básicas van a surgir de los datos experimentales disponibles referidos al comportamiento estructural de la madera. Estos datos, una vez transformados en Hipótesis Básicas de la teoría que se busca, deben ser verificados experimentalmente en vista de su compatibilidad de conjunto y completados y desarrollados en el marco de una Teoría Matemática que permita construir los correspondientes “Modelos Matemáticos de Comportamiento Resistente”, o sea, la propuesta Resistencia de Materiales de los Cuerpos de Madera.

### **12. Análisis de las posibles Hipótesis Básicas**

Más que los resultados de la investigación, lo que acá se plantea es una interpretación de ellos con vistas a plantear conjeturas sobre posibles Hipótesis Básicas, las que deberán ser confirmadas o refutadas. En otras palabras, lo que estamos planteando son los lineamientos de un plan coherente de investigación que de fundamento sólido a la Resistencia de Materiales de los Cuerpos de Madera.

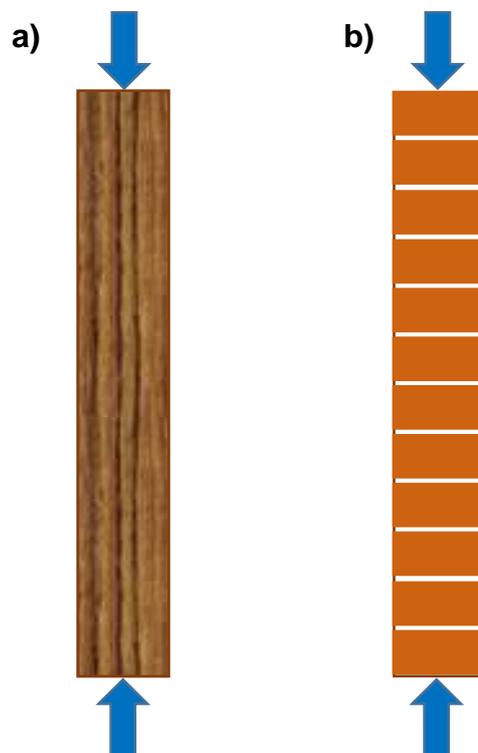
Las Hipótesis Básicas que podrían fundamentar una Resistencia de Materiales de los cuerpos de madera, son las que se exponen a continuación.

## **Hipótesis 1: Cuerpo material CONTINUO**

Son cuerpos en los que no se producen, en el interior de su masa, ni solapamientos ni discontinuidades al ser cargados.

La que terminamos de exponer es la versión de la Teoría Matemática de la Elasticidad, que tiene consecuencias en la derivabilidad de las funciones con que se interprete el fenómeno.

Desde el punto de vista resistente lo esencial consiste en que las discontinuidades que pudiese haber no se pongan de manifiesto bajo el estado de carga considerado. Por ejemplo, si consideramos dos columnas, construida con una escuadría única de madera (fig. 25.a) y otra consistente en una pila de ladrillos (fig. 25.b), no hay dudas de que el primero es un cuerpo continuo y el segundo es un cuerpo discontinuo. Pero si sometemos ambos cuerpos a una carga de compresión pura, desde el punto de vista resistente van a resultar equivalentes, pues las sollicitaciones de compresión pura, que los dos pueden transmitir sin inconveniente, son incapaces de poner en evidencia las características constitutivas que las distinguen. Si la sollicitación fuese de tracción ocurre todo lo contrario, la única que puede resistirla es la pieza monolítica.



**Figura 25**

La diferencia entre ambos casos es importante para comprender el trabajo estructural: en el caso de (fig. 25.a) se tiene un cuerpo material organizado para resistir esfuerzos axiales, mientras que el elemento mostrado en (fig. 25.b) solo

se organiza para resistir compresiones, es decir, que solo va a actuar como cuerpo resistente en la medida que la sollicitación actuante le permita a sus elementos componentes trabajar como sistema. En consecuencia, se tienen dos realidades diferentes: un cuerpo material unitario y un conjunto finito de cuerpos materiales individuales que responden a una dada organización pero, para resistir compresiones puras, ambos resultan componentes estructurales equivalentes.

En definitiva, diremos que un cuerpo material es continuo para cualquier Resistencia de Materiales, si en su masa se pueden organizar *líneas de fuerza* internas que permitan la transmisión de cargas entre dos puntos determinados del espacio

## **Hipótesis 2: Cuerpo material HETEROGÉNEO**

Los cuerpos de madera son heterogéneos por más de una causa, la principal de las cuales es, como vimos, la presencia de nudos en su masa. La existencia de estos nudos, en cantidad, características<sup>34</sup>, tamaño y distribución, depende de una serie grande de factores –especie de la planta, características de poda durante su crecimiento, origen del nudo, etc.– que hacen imposible definir un grado de heterogeneidad que pueda tener alguna similitud con una propiedad intrínseca del material tomado genéricamente. Como la heterogeneidad de la madera va a tener una fuerte influencia en la seguridad de las estructuras con ella construidas, hay que encontrar alguna forma de poder categorizarla y cuantificarla, a fin de introducir esta característica básica en los procesos de cálculo.

Un camino que se ha intentado, y que puede ser prometedor, consiste en considerar los cuerpos de madera como homogéneos, es decir, haciendo abstracción de la presencia de nudos y otros defectos, para lo que se requieren los correspondientes datos experimentales, y obtener así resultados “de máxima” de la resistencia en esas circunstancias ( $R_0$ ) y luego introducir el carácter heterogéneo real del cuerpo, mediante un “factor de nudosidad” ( $C_n$ ), menor o igual a uno (1). Su valor será función del tamaño, características, número y distribución de los nudos –y eventualmente otras imperfecciones– en el elemento considerado.

La conjetura en que se apoya este procedimiento que, reiteramos, habrá que probar o refutar experimentalmente, consiste en suponer que la resistencia y seguridad de un elemento de madera puede considerarse igual a la del mismo elemento sin defectos ( $R_0$ ) multiplicado por el *factor de nudosidad* ( $C_n$ ), sin introducir por ello en los cálculos errores de consideración. La expresión de la *resistencia de cálculo* resulta entonces:

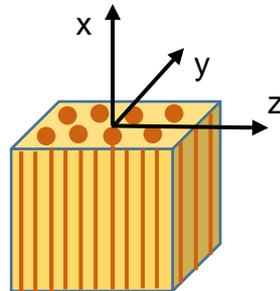
$$R = R_0 \times C_n$$

---

<sup>34</sup> Adherentes o saledizos

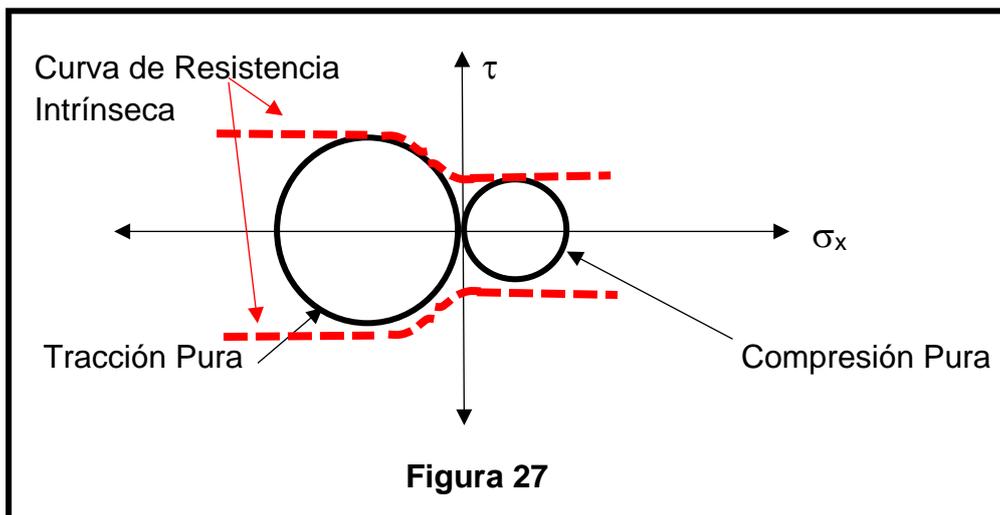
### Hipótesis 3: Cuerpo material ANISÓTROPO

La *anisotropía* es una característica esencial e insoslayable de los cuerpos de madera: su aptitud para resistir esfuerzos es totalmente diferente, tanto mecánica como cuantitativamente, según se trate de la dirección de las fibras (x) o de una perpendicular a ellas (y, z) (fig. 26)



**Figura 26**

Analizaremos este caso con el criterio planteado en el punto anterior, es decir, utilizando probetas libres de nudos y otras imperfecciones. Además, más que el comportamiento puntual del material, representado por un solo tipo de ensayo, lo que interesa al estructuralista es el comportamiento global, que pueda dar una idea de las posibilidades resistentes también globales de los cuerpos de madera. Esto se puede lograr, por ejemplo, construyendo Curvas de Resistencia Intrínseca del material, definiendo a estas como las envolventes de los Círculos de Mohr de rotura en cada dirección.



**Figura 27**

Consideremos en primer término el caso de tensiones normales puras –tracción y compresión– paralelas al eje (x) y expresemos sus resultados mediante Círculos de Mohr (fig. 27), habrá uno de tracción y otro de compresión cuyo radio será del orden de la mitad del de tracción (ver Cuadro 2, punto 2.4). La Curva de Resistencia Intrínseca va a ser tangente a ambos (fig. 27). En las cercanías del

origen, que es la zona de interés estructural, el círculo correspondiente a corte puro (círculo con centro en el origen), tiene un diámetro similar al de compresión pura. Esto se debe a que el material presenta dos planos de corte con distinta capacidad resistente (fig. 28) y la rotura se va a producir siempre según el de menor resistencia (fig. 28.b). En estas condiciones, la resistencia al corte va a estar dada por la correspondiente a planos paralelos a las fibras y la Curva de Resistencia Intrínseca toma, en el origen, la forma indicada en (fig. 27).

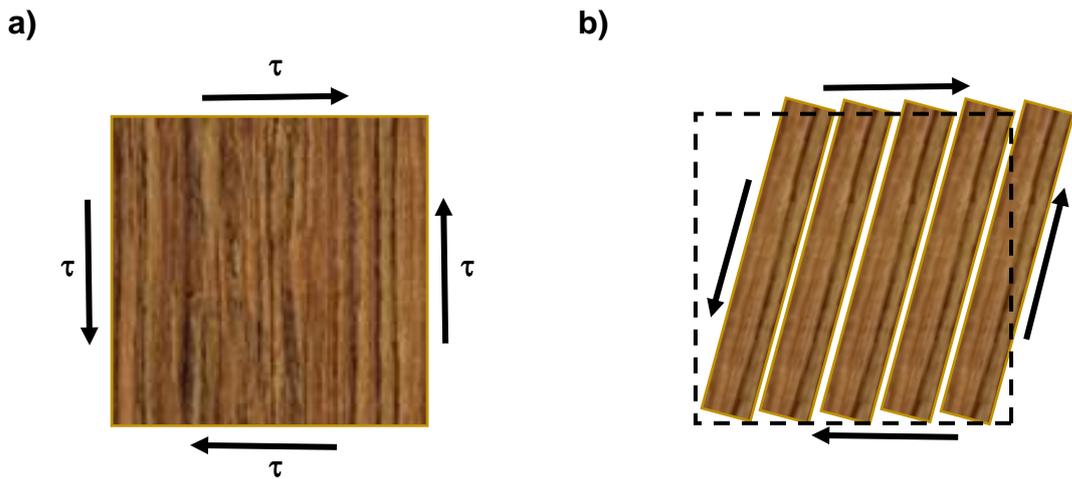


Figura 28

En cualquier sentido perpendicular al eje (x), supongamos según el eje (y), la resistencia de la madera disminuye mucho y el tipo de comportamiento cambia, por lo que se tendrá un Círculo de Mohr de tracción de radio menor que el de compresión (1,5 veces para las maderas *duras* y 4 veces para las *blandas*, por lo que la forma de la Curva de Resistencia Intrínseca también va a cambiar sustancialmente y podría ser del tipo de la de (fig. 29).

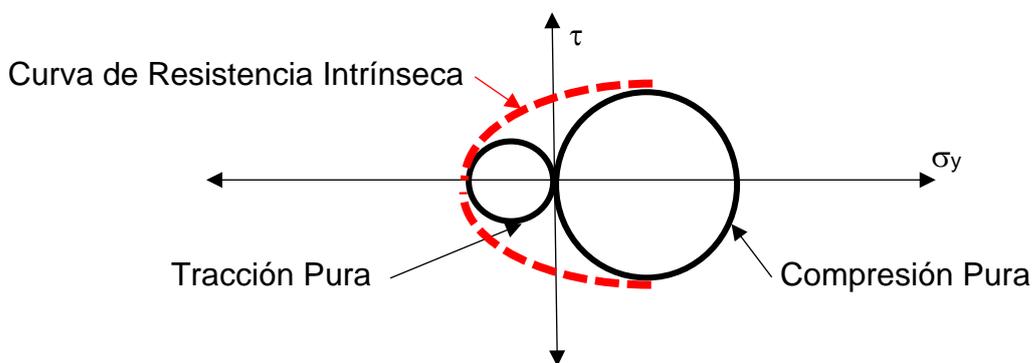


Figura 29

Las Curvas de Resistencia Intrínseca en el plano representan cortes específicos de una superficie tridimensional compleja que, en un espacio euclidiano,

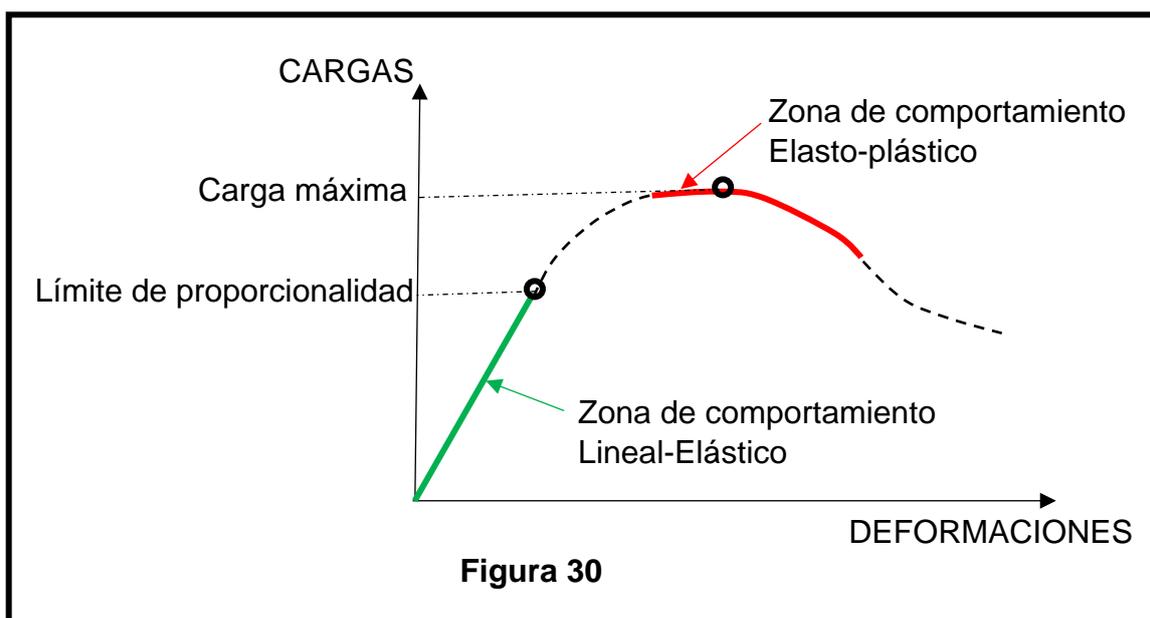
representa todas las posibles resistencias de los cuerpos materiales, en este caso de los de madera. Para los fines estructurales que ahora nos interesan, no es necesario incursionar en estas complejidades matemáticas.

Si bien en las idealizaciones de las estructuras reales que proporciona la Resistencia de Materiales –en los que denominamos *modelos matemáticos*– normalmente no aparecen solicitaciones triaxiales, en dichas estructuras reales sí se presentan. A tal efecto debemos tener en cuenta que, en los estados triaxiales de tracción, en los que naturalmente predominarán las direcciones menos resistentes, (y) y (z) (fig. 26), evidentemente la resistencia va a estar determinada por estas últimas y va a ser mínima. En los estados triaxiales de compresión, es imaginable un aumento de resistencia, al menos para solicitaciones no muy elevadas. En (fig. 27) no se hace ninguna hipótesis sobre esos casos, mientras que en (fig. 28) se ha supuesto que la máxima resistencia a tracción se tiene para *tracción uniaxial*.

#### **Hipótesis 4: Cuerpo material LINEAL ELÁSTICO para cargas suficientemente bajas y ELÁSTO-PLÁSTICO en rotura**

La curva cargas-deformaciones para cualquier tipo de solicitación, tiene la forma genérica indicada en (fig. 30). Para el análisis estructural lo que interesa de ella fundamentalmente son dos zonas:

- a) La zona de *comportamiento lineal-elástico* que se extiende entre el origen de coordenadas y el límite de elasticidad ( $f_{we}$ ), a partir del cual comienzan a aparecer deformaciones permanentes en el elemento cargado. A todos los efectos prácticos se puede suponer que el Límite de Elasticidad coincide con el Límite de Proporcionalidad. Esta parte de la curva debe mantener sus propiedades para un número grande de ciclos de carga, pues es la zona correspondiente al trabajo de la estructura en servicio.



**b)** La zona de *comportamiento elasto-plástico* corresponde a las inmediaciones de la carga máxima y cubre deformaciones anteriores y posteriores a este punto. Esta zona, que comprende el comienzo de la zona descendente de la curva cargas-deformaciones, en principio solo interesa conocerla para cargas monotónicas pues, una vez alcanzado este valor, el cuerpo queda “fuera de servicio”, ha agotado su capacidad portante y no va a recuperarla. Qué ocurre en ella para cargas repetidas es, por cierto, un dato experimental significativo, pero que solo cobrará interés en análisis estructurales avanzados (resiliencia, robustez).

Ambas zonas son de interés para el análisis estructural, pero lo son para situaciones estructurales diversas, para circunstancias diferentes y para encuadres teóricos distintos.

La zona *lineal-elástica* corresponde al funcionamiento estructural en servicio, es decir, para el análisis de situaciones que seguramente se van a producir y posiblemente un número grande de veces durante la vida útil de la construcción. Dadas las características de esta zona de la curva, el encuadre teórico a intentar será una adaptación del de la Resistencia de Materiales Clásica.

El conocimiento de la zona *elasto-plástica* es imprescindible para evaluar la seguridad estructural y corresponde a situaciones de carga –los estados de rotura o puesta fuera de servicio– que no debieran presentarse durante la vida útil de la estructura pues representan la carga de colapso estructural.

## **CUARTA PARTE:**

### **Propuesta de un Orden de Prioridades**

En base a los supuestos enunciados en el punto anterior y a la necesidad de probarlos o refutarlos, se considera que un orden lógico de prioridades en la planificación de futuras líneas de investigación sobre el tema “maderas”, podría ser el siguiente:

#### **13. Determinación de las probetas a utilizar para los diferentes ensayos**

- 1) Flexión en sentido de las fibras
- 2) Flexión perpendicular a las fibras
- 3) Tracción en sentido de las fibras
- 4) Tracción perpendicular a las fibras
- 5) Compresión en sentido de las fibras
- 6) Compresión perpendicular a las fibras
- 7) Corte en sentido de las fibras
- 8) Corte perpendicular a las fibras
- 9) Fenómenos de fluencia y rotura bajo carga sostenida
- 10) Retracción e hinchamiento

#### **14. Elementos con las fibras en sentido longitudinal, ensayos en tiempos cortos**

- 1) Determinación de la extensión y características de la zona de comportamiento elástico en flexión bajo cargas repetidas
- 2) Determinación de la extensión y características de la zona de comportamiento elástico en tracción y compresión bajo cargas repetidas
- 3) Determinación del comportamiento resistente en flexión en el entorno de la carga máxima, características de la rama descendente del diagrama cargas-deformaciones, formación de rótulas plásticas
- 4) Determinación de las características de la rama descendente de dicho diagrama bajo sollicitaciones de tracción y compresión
- 5) Determinación de las características de la rotura por corte
- 6) Construcción de las Curvas de Resistencia Intrínseca

## **15. Elementos con las fibras en sentido transversal ensayados en tiempos cortos**

- 1) Determinación de las resistencias a tracción, compresión, flexión y corte
- 2) Construcción de la Curva de Resistencia Intrínseca

## **16. Acción del tiempo**

Hay que determinar las siguientes características reológicas de las maderas:

- 1) Fluencia
- 2) Retracción e hinchamiento
- 3) Rotura bajo carga sostenida

\* \* \* \* \*

## **Bibliografía**

- [1] John R. Barnett y George Jeronimidis: "Wood Quality and Biological Basis", Blackwell Publishing, CRC Press, UK.
- [2] Donald R. Askeland y Pradeep P Phulé: "Ciencia e Ingeniería de los Materiales" (capítulo 17), Thompson, México, 2004.
- [3] William F. Smith: "Ciencia e Ingeniería de Materiales", Mc Graw Hill, México, 2004.
- [4] L. García Esteban, A. Guindeo Casasús, C. Peraza Oramas, P. de Palacios de Palacios: "La Madera y su anatomía", editado por Fundación Conde del Valle de Salazar, Mundi-Prensa y Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho, Madrid, 2003.
- [5] R.Daviau, C.Filliatre: "Introduction aux Materiaux Composites", Ediciones del C.N.R.S, Instituto de Materiales compuestos, París, 1987.

## Anexo A: El concepto de “Material Compuesto” en aplicaciones Resistentes

Los *materiales compuestos* consisten en “la asociación resistente de materiales con características diversas y complementarias”. El hombre los ha construido y utilizado desde muy antiguo: el adobe, que consiste en barro reforzado con fibras vegetales; el hormigón armado, que nace a mediados del siglo XIX y los de base sintética cuyo empleo comienza a mediados del siglo XX. La madera es un material compuesto bifásico de origen biológico que el hombre ha utilizado durante toda su larga historia de más de 2.500 millones de años.

Los materiales compuestos bifásicos constan de dos (2) componentes materiales y una (1) mecánica que son: a) una matriz material que resiste bien compresiones y no tracciones; b) un conjunto grande de fibras materiales, que son esencialmente elementos unidimensionales desde el punto de vista estructural y a nivel ingenieril; c) una componente mecánica consistente en esfuerzos superficiales que vinculan ambas componentes materiales originando su trabajo conjunto y solidario.

La *matriz* puede ser cualquier material capaz de aportar a un cuerpo material su masa y su forma y, además, debe poseer aceptable resistencia a compresión.

Las *fibras* aportan al conjunto resistencia a tracción. Conviene que sean de pequeño diámetro pues, a volumen constante de material mientras menor sea el diámetro mayor será, en la misma proporción, su superficie externa, lo que favorece su vínculo con la matriz.

La *componente mecánica*, mediante la que se logra un trabajo resistente conjunto y solidario. Consisten en fuerzas de adherencia y de pegado, tanto de origen físico como químico.

\* \* \* \* \*





[lemej.unnoba.edu.ar](http://lemej.unnoba.edu.ar)

[www.unnoba.edu.ar](http://www.unnoba.edu.ar)

**LEMEJ**

  
**UNNOBA**  
UNIVERSIDAD NACIONAL  
NOROESTE • BUENOS AIRES