

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE  
GUATEMALA**

**Facultad de Ciencias y Humanidades**

**Determinación de propiedades físicas y mecánicas de  
tres especies forestales ubicadas en el bosque muy  
Húmedo subtropical cálido**

**Luis Fernando Vásquez Mendoza**

ESTADÍSTICA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

**Guatemala  
2004**

**Determinación de propiedades físicas y mecánicas de  
tres especies forestales ubicadas en el bosque muy  
Húmedo subtropical cálido**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE  
GUATEMALA**

**Facultad de Ciencias y Humanidades**

**Determinación de propiedades físicas y mecánicas de  
tres 3 especies forestales ubicadas en el bosque muy  
Húmedo subtropical cálido**

**Trabajo de Investigación para optar al grado  
académico de Licenciatura en Ingeniería Forestal**


Por:

**Luis Fernando Vásquez Mendoza**

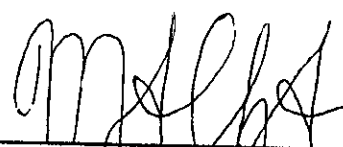
**BIBLIOTECA**  
**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**


**Guatemala  
2004**


Vo.Bo.

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Marco Chávez

Tribunal:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Marco Chávez

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Cesar Castañeda

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. René Zamora

Fecha de aprobación:

Guatemala, 12 de febrero de 2004

## PREFACIO

La investigación presente fue impulsada por el Proyecto de Investigación Forestal del Instituto Nacional de Bosques, para la resolución de problemas de desarrollo forestal, a través de la Universidad del Valle de Guatemala.

Se agradece la colaboración de cada una de las personas e instituciones que ayudaron a la realización de este documento, ya que sin su presencia no hubiera sido posible concluir el mismo.

# CONTENIDO

	Página
Prefacio.....	ii
Contenido.....	iii
Listado de Cuadros.....	vi
Listado de Figuras.....	xiii
Resumen.....	ix
Capítulos	
I. Introducción.....	1
II. Antecedentes.....	3
A. Importancia de estudios tecnológicos.....	3
B. Características generales de la madera.....	4
C. Planos de la madera.....	6
D. Influencia de la especie en las propiedades de la madera.....	7
III. Generalidades de las propiedades físicas.....	8
A. Densidad.....	8
B. Contracción.....	9
C. Contenido de humedad.....	10
D. Requisitos básicos de las maderas para determinar su uso adecuado.....	10
IV. Generalidades de las propiedades mecánicas.....	13
A. Influencia de la anisotropía de la madera.....	15
B. Correlación entre densidad y resistencia.....	16
C. Correlación entre higroscopicidad y resistencia.....	17

V. Ensayos mecánicos de la madera.....	19
A. Resistencia a la compresión.....	19
Compresión axial. Resultados de los ensayos. Influencia de la humedad. Influencia de la textura. Influencia de la densidad.....	19
Compresión transversal. Ensayos y resultados. Influencia de la anisotropía. Influencia de la dirección de carga respecto a los anillos de crecimiento. Compresión localizada.....	24
B. Resistencia a la flexión estática. Resultado de los ensayos. Influencia de los apoyos. influencia de la escuadria.....	27
C. Resistencia al clivaje.....	30
D. Dureza de la madera.....	30
E. Influencia de algunos factores en las propiedades mecánicas.....	32
Fenómeno de fluencia o flujo plástico de la madera.....	32
Influencia de los defectos o anomalías de la madera.....	35
Efecto de los nudos.....	35
Efecto de la inclinación de las fibras.....	37
Influencia de las grietas y rasgaduras.....	38
Influencia de los entalles y perforaciones.....	38
Influencia de la temperatura.....	39
VI. Descripción botánica de las especies a trabajar.....	41
VII. Materiales y métodos.....	43
A. Identificación de la especie forestal.....	43
B. Selección y número de árboles.....	43
C. Marcado en el campo.....	43
D. Transporte del material.....	44
E. Corte y preparación de las probetas.....	44

F. Descripción de los ensayos.....	45
Flexión estática. Descripción. Procedimiento.....	45
Compresión paralela a la fibra. Descripción Procedimiento.....	47
Compresión perpendicular a la fibra. Descripción. Procedimiento. ....	48
Corte paralelo a la fibra. Descripción. Procedimiento.....	50
Dureza. Descripción. Procedimiento.....	51
Peso específico. Descripción. Procedimiento.....	52
Contracción volumétrica. (Tangencial, Radial y Axial).....	54
Contenido de humedad.....	54
G. Determinación de esfuerzos básicos.....	54
Factor de corrección por variabilidad.....	55
Corrección de esfuerzos por disminución de la resistencia de la madera sujeta a cargas estáticas y permanentes por un período de largo tiempo.....	56
Factor de corrección por grado de sazónamiento de la madera.....	56
Factor de seguridad.....	57
Resumen de corrección para obtener los esfuerzos básicos.....	57
Estadística.....	58
VIII. Resultados.....	60
IX. Discusión.....	63
X. Conclusiones.....	68
Recomendaciones de uso.....	69
XI. Bibliografía.....	70

XII. Apéndice .....	72
A. Fotografías de madera de dulce quemado.....	72
B. Fotografías de madera de cola de pava.....	73
C. Fotografías de madera de chirico.....	74
D. Módulo de elasticidad (dulce quemado).....	75
E. Módulo de elasticidad (cola de pava).....	76
F. Módulo de elasticidad (chirico).....	77
G. contracción (dulce quemado).....	78
H. Contracción (cola de pava).....	79
I. contracción (chirico).....	80

## LISTADO DE CUADROS

	Página
No. 1 Tipo de bosque y suelo .....	60
No. 2 Características generales de los árboles.....	60
No. 3 Características generales de la madera.....	60
No. 4 Propiedades físicas dulce quemado.....	61
No. 5 Propiedades físicas cola de pava.....	61
No. 6 Propiedades físicas chirico.....	61
No. 7 Resumen propiedades físicas.....	61
No. 8 Propiedades mecánicas dulce quemado.....	62
No. 9 Propiedades mecánicas cola de pava.....	62
No. 10 Propiedades mecánicas chirico.....	62
No. 11 Resumen de propiedades mecánicas.....	62

## LISTADO DE FIGURAS

	Página
No. 1 Planos de la madera.....	6
No. 2 Ruptura por compresión paralela en madera seca (a), y madera seca al aire (b).....	21
No. 3 Diagrama esfuerzo-deformación.....	22
No. 4 Tamaño mínimo de la longitud de apoyo según la pieza interesada.....	26
No. 5. Gráfico carga - deformación en flexión.....	28
No. 6 Diagrama de prueba para determinación de dureza.....	32
No. 7 Fenómeno de fluencia.....	33
No. 8 Influencia de los nudos en la resistencia.....	36
No. 9 Influencia de la inclinación de las fibras.....	37
No. 10 Influencia de las grietas y rasgaduras.....	38
No. 11 Influencia de los entalles y perforaciones.....	39
No. 12 Corte de Probetas en aserradero.....	44
No. 13 Máquina usada en la determinación de Flexión Estática.....	46
No. 14 Disposición de la probeta para la obtención de la compresión paralela a la fibra.....	47
No. 15 Disposición de la probeta para la obtención de la compresión perpendicular a la fibra.....	49
No. 16 Máquina usada para la determinación de corte paralelo a la fibra.....	50
No. 17 Balanza usada para determinar el peso de las probetas (a), y vernier empleado para determinar el volumen (b).....	52

## RESUMEN

La presente investigación centra su objetivo general en la determinación y análisis de propiedades fisicomecánicas de especies forestales nativas de la región norte de Guatemala, las cuales a futuro, podrían ser consideradas para incorporarlas al mercado nacional debido a sus propiedades para usos comerciales.

La madera para la realización de las pruebas fue obtenida en la finca La Firmeza, ubicada en el municipio de Morales, Izabal. Se realizó la evaluación de seis importantes pruebas mecánicas a que se ve sometida la madera, entre las cuales destacan, módulo de elasticidad y esfuerzo máximo a la flexión estática, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra, cizalle o corte y dureza. Asimismo, se determinaron las propiedades físicas de mayor relevancia para la madera, vale decir, densidad y contracción. Todos los ensayos involucrados en este estudio fueron hechos en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala, donde se realizaron siguiendo las pautas generales que para estos efectos se definen en las normas estadounidenses denominadas American Society For Testing And Materials (ASTM) designación D-143.

A partir de los ensayos de laboratorio, se puede decir que la especie forestal *Phoebe mexicana* (Dulce Quemado) es la que presentó características más aceptables dado que tiene una estabilidad dimensional muy aceptable y obtuvo los resultados más altos en lo que a resistencia se refiere; de acuerdo a la percepción que se tuvo de su madera, se puede recomendar su uso para estructuras o para pavimento (parque, listón piso), ya que es muy dura. Le sigue la especie forestal *Cupania guatemalensis* (Cola de Pava), aunque no por esto menos importante, ya que sus resultados también mostraron que ésta tiene potencial para someterla a usos comerciales; debido a las características observadas en esta especie, se recomienda su uso para carpintería (amueblados, puertas, marcos de ventana, etc.), debido a sus propiedades, tanto fisicomecánicas, así como visuales. Por último, se tiene *Licania arborea* (Chirico), la cual no presentó datos tan aceptables como las dos especies anteriormente mencionadas; por lo observado en la madera de esta especie, se recomienda su uso para carpintería debido a su fácil trabajabilidad, observada en el proceso de asear.

## I. INTRODUCCIÓN

Como bien se sabe, el trópico y el subtrópico americano se caracterizan por la gran variabilidad de zonas ecológicas, lo cual ha permitido el desarrollo de mucha diversidad de especies forestales (CATIE 2000). Desafortunadamente en Guatemala, existen diversos factores que están acabando con esta diversidad, de entre los cuales se puede mencionar uno que ha mantenido en la sumisión a Guatemala con respecto a otros países, la falta de investigación.

Los estudios realizados en Guatemala sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de especies forestales latifoliadas son escasos, basándose en las especies más comunes usadas en el mercado, y la literatura que se consulta para el desarrollo de proyectos, se fundamenta casi exclusivamente en publicaciones del extranjero. Esta situación provoca un desconocimiento de muchas características de la madera de ciertas especies forestales y el aprovechamiento inadecuado de los mismos.

El presente trabajo es una investigación sobre las principales propiedades físicas y mecánicas de la madera de tres especies forestales ubicadas en el bosque muy húmedo subtropical cálido, las cuales son:

- *Phoebe mexicana* Meissn (Dulce Quemado)
- *Cupania guatemalensis* Turcz. (Cola de Pava)
- *Licania arborea* Seem. (Chirico)

Los resultados esperados de esta investigación consisten en obtener, para cada especie forestal, las propiedades físico mecánicas más importantes, las cuales son de gran ayuda para determinar los usos potenciales a los que estas maderas pueden ser sometidas, con lo que se podrá hacer un aprovechamiento más preciso de la madera.

Las especies arbóreas fueron elegidas dependiendo de criterios tales como, potencial de utilización en diseños estructurales, falta de información tecnológica sobre las especies, así como su ubicación.

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

#### Objetivo General

- Estudiar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de las siguientes especies forestales latifoliadas de la región norte de Guatemala:

- *Phoebe mexicana* Meissn (Dulce Quemado)
- *Cupania guatemalensis* Turcz. (Cola de Pava)
- *Licania arborea* Seem. (Chirico)

#### Objetivos Específicos

- Describir la madera de cada especie estudiada en términos de color, grano, textura, brillo, sabor y olor.

- Evaluar las siguientes propiedades mecánicas de cada especie: flexión estática, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra y corte.

- Evaluar las siguientes propiedades físicas de cada especie: peso específico, contracción volumétrica así como la contracción radial, tangencial y axial, y el contenido de humedad.

- Según los datos obtenidos, recomendar los usos potenciales a los que se pueden someter las especies evaluadas.

## II. ANTECEDENTES.

Los estudios realizados en Guatemala sobre características tecnológicas de la madera de especies forestales latifoliadas son escasos, estos se han desarrollado aisladamente y no incluyen la totalidad de información, a la vez que se basan en las especies más comunes usadas en el mercado. Esta situación provoca un desconocimiento de muchas características de la madera de ciertas especies forestales, por lo que no son aprovechadas adecuadamente.

El Proyecto de Investigación Forestal del Instituto Nacional de Bosque (INAB), en su afán por propiciar la investigación en el ámbito forestal para la resolución de problemas en dicha rama, ha propuesto la realización de la presente investigación a través de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG).

Los estudios sobre las características tecnológicas de la madera encaminados a la determinación de usos probables para la industria, se iniciaron a principios de siglo en las regiones nórdicas, los cuales se extendieron recientemente a las regiones tropicales y subtropicales al sentirse la necesidad, en el mundo industrializado, de la utilización de las llamadas maderas preciosas (Valdes, 1988).

### A. Importancia de estudios tecnológicos

El comportamiento de una madera durante su uso, está íntimamente relacionado con su anatomía; la forma y dimensiones de los elementos estructurales, así como su organización dentro del cuerpo de la madera, determinan las características de cada especie (INIF, 1981).

Basándose en estudios tecnológicos, es posible planear la máxima utilización y conservación de los productos maderables, así la industria obtendría un número mayor de especies disponibles y consecuentemente mayores posibilidades de diversificación, sustitución de maderas, nuevos mercados y mayores beneficios económicos (INIF, 1981). Esto a su vez, abriría las puertas a tener un manejo sostenible del bosque.

## B. Características generales de la madera

Las magnoliophytas constituyen en la actualidad, el grupo de plantas dominantes sobre la superficie de la tierra, dividiéndose en magnoliópsidas y liliópsidas; para fines maderables, es entre las magnoliópsidas en donde se encuentran los árboles de gran talla, cuya madera es susceptible de explotación (Barajas, 1981).

La madera representa todas aquellas porciones de los ejes de las plantas, principalmente troncos, provistos de crecimiento secundario que se produce por división de las células del cambium. La división de estas células da origen a distintos elementos de la madera que pueden tener funciones diversas, ya que forman vasos leñosos que son parte del tejido de conducción y fibras o traqueidas que son elementos que van a dar resistencia al vegetal formando una estructura de sostén o tejido esquelético (Barajas, 1981).

Las células que constituyen la madera muestran cierta variabilidad en cuanto a su ordenación, disposición y abundancia, siendo característica de cada especie; la ordenación de la mayoría de estas células tiene una orientación paralela al eje del tronco y un número menor tiene una disposición perpendicular al eje y por lo tanto, una orientación radial al mismo (Barajas, 1981).

Los tejidos del xilema que se forman primero y que conservan una posición interna son conocidos como duramen, a los de color más claro y que guardan una posición externa, se les conoce como albura. El color más oscuro en el duramen, es debido a la presencia de extractivos como taninos, resinas, gomas, materiales colorantes y de desecho, que por lo general tienen color oscuro y que son causantes de la coloración diferente en esa porción del xilema que los contiene (Barajas, 1981).

Para clasificar maderas, se considera de importancia los siguientes términos: textura, que se refiere al tamaño de los elementos más abundantes, vasos, fibras o traqueidas (poros pequeños de textura fina); grano o hilo, que se refiere a la dirección general de orientación de los elementos celulares, principalmente fibras en latifoliadas y traqueidas en coníferas, de manera que puede haber grano recto y paralelo al eje

longitudinal del tronco, inclinado y por lo general en espiral al tronco, entrecruzado, ondulado y en apariencia de hoyuelos. Algunas sustancias contenidas en la madera, le dan ciertos caracteres distintivos: el olor y el sabor. La presencia de extractivos influye en parte en la capacidad de reflejar luz, mostrando cierto lustre o brillo característico de cada especie. El veteado es un carácter fundamental para el uso de la madera, sobre todo cuando se le emplea con fines estéticos o decorativos (Barajas, 1981).

La madera de las latifoliadas es más compleja que la de las coníferas, ya que en su estructura hay mayor especialización y más variedad en sus elementos. El elemento más característico de las latifoliadas son los vasos o poros, formados por cadenas de células tubulares ensambladas una a continuación de otra, creando un sistema de conducción ascendente de soluciones. Al observar las estructuras en sentido transversal al eje del tronco, se ven poros y por lo general es el carácter que más sobresale debido a su mayor diámetro en comparación con el de los otros elementos. La disposición y abundancia de los poros dentro de los anillos de crecimiento es característica de cada especie y puede presentarse en forma anular, semianular o difusa (Barajas, 1981).

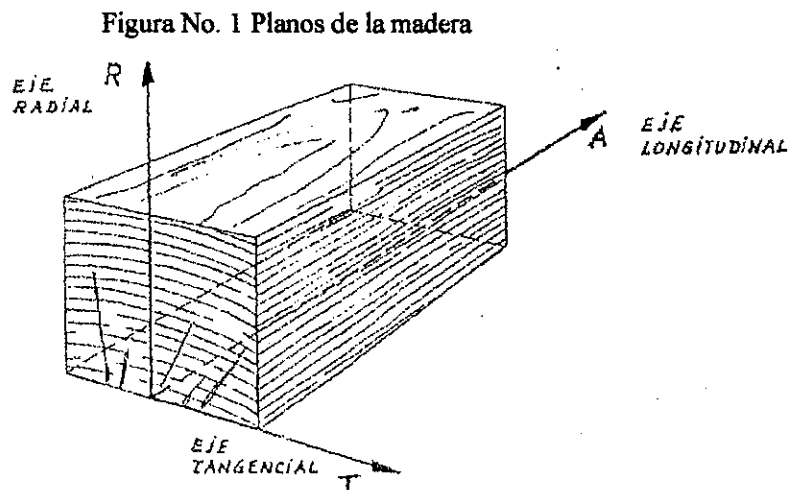
Las fibras son los elementos encargados del soporte mecánico, su forma es fusiforme, alargada, de tamaño menor que el de las traqueidas de las coníferas, son delgadas, el grosor de su pared y su tamaño es característico de la especie, sus puntuaciones son pequeñas. Estos elementos son los principales responsables del comportamiento fisicomecánico de las maderas latifoliadas (Barajas, 1981).

Otro carácter de importancia es la presencia de materiales que ocluyen la cavidad de los vasos y las células de parénquima, estos pueden ser de muy diversos orígenes y características químicas, como tálides, gomas, resinas, que en algunos casos pueden conferir a las maderas, características de resistencia natural al ataque de hongos e insectos o caso contrario, ser atrayentes de insectos; estos materiales son los responsables de la duraminización, del color y olor de las maderas. Otros materiales algunas veces presentes dentro del parénquima, son cristales de carbonato de calcio y sílice, este último responsable de problemas durante el proceso de aserrío (Barajas, 1981).

### C. Planos de la madera

Dado el origen biológico de la madera, las características tanto anatómicas como físico-mecánicas van a ser diferentes en cada uno de los planos que la forman debido a su anisotropía; sus propiedades variarán de acuerdo con la dirección de eje o plano según el cual se va a realizar el análisis. De esta manera, se pueden distinguir tres ejes distintos; eje longitudinal, paralelo al eje principal del tronco; eje radial, formando una línea radial al cono del tronco y perpendicular a la corteza; eje tangencial, formando una tangente sobre los anillos de crecimiento y perpendicular al eje radial (Figura No. 1). La intersección de estos ejes forman los llamados planos de la madera:

- Plano transversal o longitudinal (A)
- Plano longitudinal radial (R)
- Plano longitudinal tangencial (T)



(Karsulovic 1994)

Como en cada uno de los planos, las estructuras anatómicas se observan de manera diferente, es conveniente observarlos en conjunto para tener una idea clara, tridimensional de las células y tejidos que constituyen la madera (Barajas, 1981).

## D. Influencia de la Especie en las Propiedades de la Madera

Las diferentes maderas provienen de distintas especies, las que se distinguen cada una de ellas, por un plano leñoso característico. (Karsulovic, 1994).

El plano leñoso de cada especie define la naturaleza y disposición de las células que la constituyen, es decir, su estructura anatómica, pero esta estructura puede ser también diferente para una misma especie según las condiciones de la vida del árbol, tales como: clima (altitud, latitud, exposición), suelo (naturaleza, fertilidad), edad y tratamiento del bosque (monte bajo, monte alto, etc.) (Karsulovic, 1994).

Luego, una madera no puede ser definida por la sola consideración de la especie, pudiendo variar sus propiedades mecánicas entre amplios límites; así pues, para caracterizar una madera bajo el punto de vista mecánico, es necesario especificar su proveniencia (Karsulovic, 1994).

### III. GENERALIDADES DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

El estudio de propiedades físicas de la madera permite entender el comportamiento frente a diferentes cambios introducidos por un proceso de transformación o acondicionamiento (León, 1994).

La densidad y las contracciones tienen influencia sobre los aspectos de trabajabilidad de la madera, ya que si sus valores son altos o bajos, también las propiedades mecánicas y los grados de deformación serán altos o bajos (Acosta, 1967).

Estas dos propiedades se encuentran íntimamente relacionadas y en general para una misma disminución del contenido de humedad, las maderas con densidad aparente alta sufren mayores contracciones que las de densidad aparente baja, esto es explicable, porque las maderas pesadas tienen una mayor cantidad de pared celular para dejar hinchar o contraer; aunque esto no es una regla general, es un buen indicador del comportamiento de las maderas. Las excepciones que se presenten, son debidas posiblemente a que todo no es pared celular y en el lumen de las fibras, puede haber materiales infiltrados que reducen la contracción y el hinchamiento (Acosta, 1967).

#### A. Densidad

La determinación de este valor es una referencia útil de calidad, puede ayudar en la selección y clasificación de maderas, permite estimar su resistencia, habilidad para sostener clavos y facilidad de trabajo en las máquinas; es también índice de la resistencia a diversos usos y sirve como base para estimar rendimientos de pulpa y requisitos para las condiciones. En términos generales, se puede decir que la densidad depende del tamaño de las células, espesor de las paredes celulares y la interrelación entre el número de las diferentes clases de células constituyentes del leño (Acosta, 1967).

Tabla 1. Clasificación según densidad aparente seca desarrollada por Markwardt y Heck, citados por Valdes (1988).

Grupo No.	Rango	Clasificación
1	Menor de 0.20	Extremadamente liviana
2	De 0.20 a 0.25	Excesivamente liviana
3	De 0.25 a 0.30	Muy liviana
4	De 0.30 a 0.36	Liviana
5	De 0.36 a 0.52	Moderadamente liviana
6	De 0.52 a 0.50	Moderadamente pesada
7	De 0.50 a 0.60	Pesada
8	De 0.60 a 0.72	Muy pesada
9	De 0.72 a 0.86	Excesivamente pesada
10	Mayor de 0.86	Extremadamente pesada

## B. Contracción

Las contracciones en una muestra de madera, se presentan al disminuir su contenido de humedad por debajo del punto de saturación de la fibra. El agua u otros líquidos polares al salir de la pared celular, causan un acercamiento de las microfibrillas, el cual está en proporción al líquido extraído. Una excepción de que la madera no se contrae abajo del punto de saturación de la fibra es el colapso (aplastamiento de células por secado brusco), defecto que al presentarse hace que los datos de contracción obtenidos no puedan darse como cambios dimensionales normales de la madera (Acosta, 1967).

Los valores de contracción indican la estabilidad dimensional o los cambios que puede tener una madera, al ser sometida a condiciones variables de humedad relativa. Dichos valores permiten recomendar ciertos usos y ayudan en la elaboración de programas de secado (Acosta, 1967).

Tabla 2. Clasificación según la contracción volumétrica utilizada por Arcstegui et. al. y citada por Valdes (1988)

Grupo No.	Rango (%)	Clasificación
1	Menor de 9	Muy baja
2	De 9.1 a 11	Baja
3	De 11.1 a 13	Media
4	De 13.1 a 15	Alta
5	Mayor de 15	Muy alta

Tabla 3. Clasificación según la relación de contracción tangencial y radial (CT / CR) utilizada por Arostegui et. al. y citada y modificada por Valdes (1988)

Grupo No.	Rango (%)	Clasificación	Estabilidad
1	Menor de 1.5	Muy baja	Muy estable (no se agrietan, buen secado).
2	1.51 a 2	Baja	Estable (muy pocas grietas, muy leve atención al secado).
3	2.1 a 2.5	Media	Moderadamente estable (pocas grietas, leve atención al secado).
4	2.51 a 3	Alta	Inestable (se agrietan, atención al secado).
5	Mayor de 3	Muy alta	Muy inestable (fuertes grietas, secado cuidadoso).

### C. Contenido de Humedad

La madera es una sustancia higroscópica con gran afinidad por el agua (líquida o en vapor) y otros líquidos polares, todas las propiedades físicas, mecánicas y no mecánicas, características de elaboración, resistencia al ataque de hongos, son afectadas por las fluctuaciones en los contenidos de humedad, siendo ésta la razón por la cual los valores obtenidos en ensayos de madera deben ir acompañados de los respectivos contenidos de humedad (Acosta, 1967).

D. Requisitos básicos de las maderas para determinar su uso adecuado (Rincón, 1980).

#### 1. Estructuras

- a. Densidad aparente seca de 0.4 a 0.8.
- b. Moderada a baja contracción volumétrica (menor que 12%).
- c. Buena estabilidad, relación CT/CR menor o igual que 2.0.
- d. Resistente al ataque de hongos e insectos o fácil de tratar.

## 2. Encofrados

- a. Densidad aparente seca de 0.4 a 0.6.
- b. Estabilidad dimensional (Contracción volumétrica menor o igual a 1.6).
- c. Color uniforme.
- d. Adecuada resistencia mecánica.
- e. Baja absorción de humedad.
- f. Facilidad de trabajo.

## 3. Carpintería de obra

- a. Bueno comportamiento al trabajo con máquinas de carpintería.
- b. Estabilidad dimensional (Contracción volumétrica menor o igual a 12%; Relación CT/CR menor o igual a 2.0).
- c. Buena apariencia.
- d. Textura media a fina y uniforme.
- e. Acabado bueno a regular.
- f. Liviana a moderadamente pesada.

## 4. Pisos

- a. Densidad aparente seca mayor o igual a 0.7.
- b. Poca o moderada contracción volumétrica (10% a 15%).
- c. Buena característica para el trabajo a máquina.
- d. Buena apariencia.

## 5. Mangos de herramientas, artículos atléticos y deportivos

- a. Densidad aparente seca entre 0.55 y 0.65 a 12 % de humedad.
- b. Grano recto.
- c. Buena apariencia.
- d. Fácil de trabajar mecánicamente.

## 6. Ebanistería

- a. Poca contracción.
- b. Buena apariencia.
- c. Buen acabado.
- d. Buen comportamiento al encolado.
- e. Buena resistencia y dureza.

## 7. Durmientes

- a. Buena durabilidad o aceptar tratamiento.
- b. Poca tendencia a agrietarse durante el secado.

## IV. GENERALIDADES DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas de la madera, como las de cualquier otro material, determinarán su capacidad para resistir fuerzas externas.

Se entiende por fuerza externa cualquier agente que actuando exteriormente tienda a alterar la forma o dimensión de un cuerpo. La fuerza externa crea un estado de tensión interna provocando la deformación del cuerpo, sin embargo, la deformación puede también ser producto de fuerzas que actúan internamente, como las que tienen lugar con los cambios de contenido de humedad. Las fuerzas internas que producen estas deformaciones están relacionadas principalmente con las propiedades físicas de la madera y no son debidas a fuerzas externas, por lo tanto, no están comprendidas estrictamente entre las que se refieren a resistencia (Karsulovic, 1994).

Las propiedades mecánicas determinan el uso de la madera de acuerdo a las solicitaciones o tipos de carga a que estén expuestas. El conocimiento de estas propiedades se obtiene a través de la experimentación, ya sea por medio de ensayos del material en condiciones reales (condiciones que se encuentran en la práctica) o por medio de experiencias de laboratorio en los que se hace uso de normas y aparatos de ensayos especiales. Este último es el procedimiento adoptado en general, por requerir menos tiempo y material, y por lo tanto, es el que más se adapta para el gran número de ensayos que deben realizarse debido a las variaciones naturales de la madera (Karsulovic, 1994).

Los ensayos de laboratorio se efectúan a través de métodos estándar de experimentación permitiendo obtener valores comparables entre sí para las diferentes especies de madera. Entre los métodos estándar para ensayos en madera, los de mayor uso en los diferentes países son:

- Asociación Francesa de Normas Estándares (AFNOR)
- Sociedad Americana para la Prueba de Materiales (ASTM por sus siglas en Inglés, Estados Unidos)

- Normas Industriales Alemanas (DIN por sus siglas en Alemán)
- Institución Británica de Estándares (BSI por sus siglas en inglés)
- Instituto Nacional de Normalización de Chile (INN)
- Comisión Panamericana de Normas Técnicas (Latinoamérica)

Uno de los principales objetivos de la investigación de laboratorio, es el de encontrar valores de ensayo, que son valores de resistencia y que se expresan para la mayoría de las propiedades mecánicas en valores unitarios, es decir, lo que es capaz de resistir una probeta libre de defectos por unidad de sección resistente (por ejemplo, número de kilos por  $\text{cm}^2$  de sección resistente). Estos valores, debido a la compleja estructura de la madera, difieren para cada especie observándose variaciones entre árboles de una misma especie, variaciones según el lugar geográfico de procedencia e incluso variaciones en un mismo árbol dependiendo de donde se extraigan las muestras (Karsulovic, 1994).

Por otra parte, existirán variaciones según sea el contenido de humedad de la madera, y del método de ensayo que se aplique. Todo esto lleva a especificar una serie de condiciones antes de efectuar los ensayos. El número de ensayos a realizar deberá ser estadísticamente representativo a un determinado nivel de error, expresándose los valores de ensayo en valores medios de resistencia con sus correspondientes dispersiones absolutas y relativas (Karsulovic, 1994).

Las principales propiedades que definen el comportamiento de la madera, son las siguientes:

- Resistencia a la flexión estática y dinámica
- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la tracción
- Resistencia al cizalle o corte
- Dureza
- Resistencia al clivaje

Todas estas propiedades, a excepción de la resistencia al clivaje que es propia de la madera y de otros materiales fibrosos, son comunes a todos los materiales (Karsulovic, 1994).

En general, la resistencia de la madera involucra un conjunto de propiedades que la hacen capaz de resistir fuerzas; luego, es necesario para cada caso en particular, especificar la propiedad mecánica y la posición relativa de la fuerza externa respecto a los anillos de crecimiento y las fibras. Esto permite comparar entre sí la capacidad de resistencia de las diferentes maderas; en efecto, una determinada especie puede ser más resistente a la flexión que otra, pero esta puede exceder a la primera en compresión normal a las fibras, en consecuencia no se puede decir qué especie es la más resistente si no se especifica el tipo de esfuerzo de que se trate. De lo anterior, se puede inferir entonces que ante una alternativa de elección de una madera para un determinado uso, debe tenerse en cuenta la propiedad mecánica que interese o el conjunto de ellas, esenciales para el fin que se persiga (Karsulovic, 1994).

#### A. Influencia de la anisotropía de la madera

El hecho de que las propiedades de la madera no son las mismas según la orientación de los esfuerzos en la relación a las fibras y a los anillos de crecimiento, obliga a considerar el sentido de los esfuerzos para cada sollicitación (compresión, tracción, etc.) (Karsulovic, 1994).

Se pueden distinguir los esfuerzos siguientes:

- Esfuerzo axial: paralelo a la dirección de las fibras (o esfuerzo Longitudinal).
- Esfuerzo transversal: perpendicular o normal a la dirección de las fibras, el cual pueden ser orientado en los siguientes sentidos: radial, tangencial o ángulos intermedios.
- Esfuerzo oblicuo: orientado según un cierto ángulo en relación a la dirección de las fibras.

Debido a la heterogeneidad de la madera, es necesario tener en cuenta para los ensayos la estructura de la probeta considerada, en razón de que las propiedades mecánicas dependen, como ya se dijo anteriormente, no sólo de la especie sino que

también de las condiciones de vida del árbol y de sus particularidades de crecimiento. Además, en un mismo árbol, las propiedades variarán según el lugar de donde se extraigan las probetas (Karsulovic, 1994).

En una muestra dada, las diferentes influencias se traducen en diferencias en la estructura (espesor más o menos grande de paredes de las células, diámetro variable de vasos, anillos de crecimiento más o menos anchos, texturas diferentes, etc.) y en la composición química de los elementos constitutivos (Karsulovic, 1994).

Debido a que la densidad de la madera es una resultante de la mayoría de las variaciones que en ella se presentan, ésta puede constituir, desde el punto de vista mecánico, una base de apreciación de las calidades de las maderas y ciertas normas la consideran como parámetro fundamental para expresar los resultados de los ensayos de calificación (Karsulovic, 1994).

## B. Correlación entre la resistencia y la densidad de la madera

La madera está constituida de fibras alargadas cementadas por lignina. Considerando que la densidad del material que forma las paredes de las células, o sea la sustancia madera, es igual para todas las especies, la densidad de todas ellas sería la misma si no fuera por la variación en el tamaño y arreglo de las cavidades celulares (Karsulovic, 1994).

La densidad de la madera es un índice de sus propiedades resistentes. De miles de ensayos realizados en los laboratorios de productos forestales en EE.UU., se ha encontrado que existe una relación definida entre ellas, expresadas por la fórmula siguiente:

$$R = C D^n$$

donde R es la resistencia a una sollicitación dada, C una constante que varía para cada propiedad mecánica, D la densidad y n un exponente que también difiere para diversas propiedades mecánicas (Karsulovic, 1994).

Dada la alta correlación entre la resistencia y la densidad de la madera, se acostumbra en los ensayos mecánicos, especificar, para condiciones de humedad dadas, el valor de la densidad de las diferentes probetas en ensayo. La determinación paralela de esta propiedad física asociada es de gran utilidad para fines comparativos y de análisis (Karsulovic, 1994).

Como se recordará, la densidad de la madera varía con la humedad, en general, cuando la humedad crece, la densidad crece igualmente. Para fines comparativos, es necesario siempre expresar la densidad a la humedad media de la madera seca al aire (12%). Dado que, como en la práctica es casi imposible lograr que todas las probetas alcancen exactamente el contenido de humedad de 12%, para medir su densidad, se hace necesaria una corrección de densidades (Karsulovic, 1994).

Una relación aproximada que permite hacer esta corrección sin gran error, es la siguiente:

$$D_{12} = Y \left( \frac{100 + 12}{100 - Y(30 - 12)} \right)$$

donde  $Y = P_o / V_s$ , que se denomina densidad básica y se calcula como el cociente entre el peso seco o anhidro y el volumen saturado.

### C. Relación entre la higroscopicidad de la madera y su resistencia mecánica

La resistencia mecánica de la madera varía con el contenido de humedad. La mayoría de las propiedades mecánicas aumentan con la disminución del contenido de humedad, a partir del punto de saturación de las fibras (C.H. 30%). Este incremento se debe a la rigidización de las paredes de las células conformes se van secando (Karsulovic, 1994).

No todas las propiedades mecánicas de la madera aumentan con una disminución en el contenido de humedad; aquellas que presentan tenacidad o resistencia

a los choques, disminuyen generalmente su resistencia a medida que desciende el contenido de humedad (Karsulovic, 1994).

En los ensayos, es necesario tener en cuenta el contenido de humedad de la madera en el momento en que él se efectúa, debiéndose efectuar éstos sobre probetas en condiciones de humedad iguales o similares. Este estado de humedad más o menos uniforme se puede lograr llevando la madera a un estado de equilibrio, ya sea mediante un secado en estufa exponiéndolas a un clima controlado de modo que adquiera un contenido de humedad dado, por ejemplo, 12%, humedad que ha sido adoptada internacionalmente para los ensayos mecánicos (Karsulovic, 1994).

## V. ENSAYOS MECÁNICOS DE LA MADERA

Con los ensayos mecánicos, se busca determinar las propiedades mecánicas de la madera libre de defectos. Se trata de conocer las características de la materia leñosa, independiente de los defectos que ella pueda presentar como una manera de poder comparar las maderas, pues se agrega una perturbación más a las otras que ya se han señalado (influencia de la especie, proveniencia, heterogeneidad) (Karsulovic, 1994).

La determinación de las propiedades mecánicas y físicas asociadas, se efectúa mediante ensayos normalizados sobre probetas estandarizadas libres de defectos, obtenidas y ensayadas mediante los mismos métodos (Karsulovic, 1994).

En general, estos ensayos son comparativos y empíricos y no corresponden a ciertas condiciones de empleo bien definidas (Karsulovic, 1994).

### A. Resistencia a la compresión.

En la compresión, debido a que la fuerza solicitante puede actuar en distintas direcciones, es necesario especificar el ángulo de la dirección de la fuerza en relación a las fibras. Si ella actúa paralela a las fibras se dice que es una compresión axial, si ella es perpendicular a las fibras se denomina compresión normal o transversal. Si la fuerza actúa en forma oblicua en relación a las fibras, se denomina compresión oblicua y se define por medio de un ángulo entre ella y las fibras (Karsulovic, 1994).

#### 1. Compresión axial o paralela

La madera, en muchos de sus usos, tales como columnas cortas, sopotes, etc. está sometida a cargas de esta naturaleza. Sin embargo, si se trata de columnas largas, es decir, piezas en las cuales el largo es mucho mayor que la menor dimensión de la sección transversal, se induce un momento flector antes de que se alcance a desarrollar toda la resistencia de compresión y la ruptura se produce por flexión lateral o pandeo

en lugar de por compresión (Figura 2). En dichas columnas, la carga sobre la cual se produce este esfuerzo se denomina carga crítica (Karsulovic, 1994).

Los ensayos de compresión axial se efectúan sobre piezas cortas, donde la altura de la pieza no debe sobrepasar cuatro o cinco veces la cota más pequeña con el modo de evitar que se produzca el fenómeno de pandeo (Karsulovic, 1994).

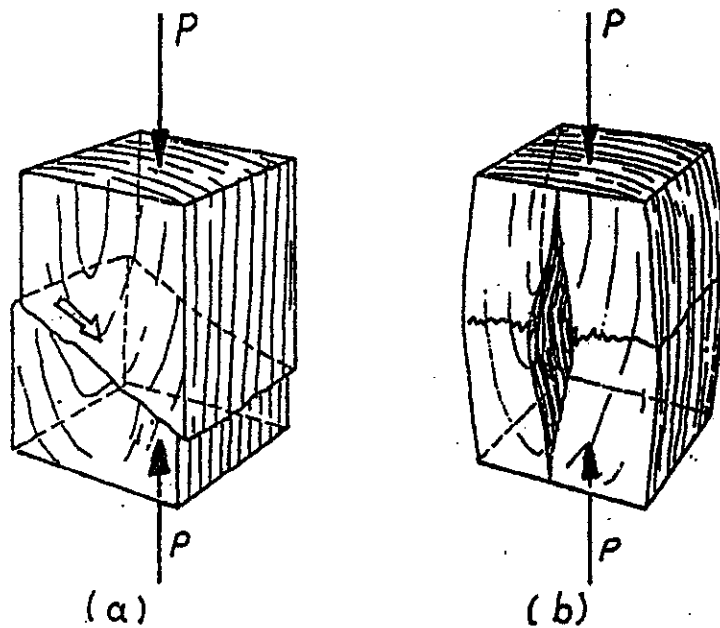
El ensayo muestra que bajo la influencia de la compresión, la probeta sufre una expansión en su parte central, pudiéndose deducir un valor de coeficiente de Poisson. Si la compresión aumenta hasta la ruptura, se observa que ésta se produce de diferentes maneras:

- En madera seca la ruptura es generalmente súbita produciéndose por rajaduras longitudinales (Figura 2a). (Karsulovic, 1994).

- En madera seca al aire se produce un deslizamiento sobre un plano oblicuo (Figura 2b) (Karsulovic, 1994).

- En madera muy húmeda, a menudo ocurre un aplastamiento progresivo de la probeta. La ruptura normal es por deslizamiento sobre un plano oblicuo, de aproximadamente  $45^\circ$  de inclinación que corresponde al plano de máximo esfuerzo de corte o cizalle, pero varía corrientemente según la especie y la estructura de la madera (Karsulovic, 1994).

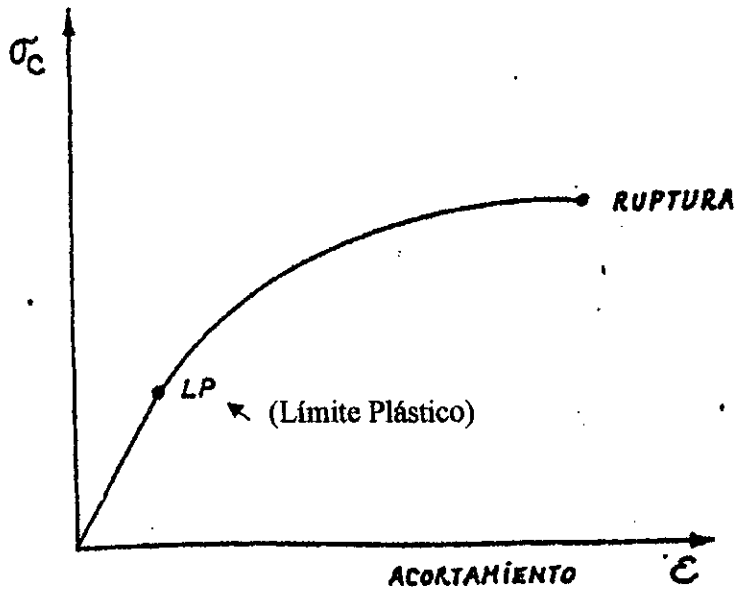
Figura No. 2 Ruptura por compresión paralela en madera seca (a), y madera seca al aire (b)



(Karsulovic, 1994).

El diagrama esfuerzo-deformación tiene una forma particular (Figura 3). Se observa que la parte rectilínea es corta, existiendo una rápida curvatura del diagrama lo que muestra que el límite elástico es rápidamente sobrepasado, entrándose a la zona de deformación plástica con cargas relativamente bajas. Se puede definir hacia el origen, un valor de módulo elástico longitudinal, pero es difícil definir un límite elástico (Karsulovic, 1994).

Figura No. 3 Diagrama esfuerzo-deformación



(Karsulovic, 1994).

Los ensayos propiamente son influidos por la forma de la probeta y por la velocidad de incremento de la carga. Como ya se dijo anteriormente, el largo relativo de la probeta debe ser tal que se evite el pandeo, la altura que se acostumbra a dar a la probeta varía entre tres a cuatro veces la más pequeña dimensión transversal. La forma de la sección de la probeta no tiene influencia, pudiendo ser circular o cuadrada pero deben tener fibra recta bien orientada. Las dimensiones no deben ser muy grandes, puesto que sería difícil tener un contenido de humedad homogéneo en todo el volumen. En cuanto a la velocidad del ensayo, éste se debe efectuar lentamente de modo que las deformaciones se vayan produciendo a medida que aumenta la carga. Si la velocidad de incremento de cargas es elevada, no se deja tiempo para que se desarrolle totalmente la deformación y la carga de ruptura es más elevada. Por el contrario, si la velocidad es muy lenta, la carga de ruptura es mínima (Karsulovic, 1994).

En consecuencia, para poder hacer comparables los resultados, la velocidad de carga debe ser precisada. En la norma francesa, por ejemplo, se anota una velocidad de 400 kg/cm<sup>2</sup> por minuto, de manera que el ensayo dura aproximadamente un minuto (Karsulovic, 1994).

## 2. Resultados de los ensayos

El ensayo consiste en determinar el esfuerzo máximo o de ruptura, que caracteriza la resistencia a la compresión de una madera, a un contenido de humedad específico (generalmente 12%.) (Karsulovic, 1994).

Se ha podido determinar, en general, que las latifoliadas de baja densidad tienen menor resistencia que las resinosas de baja densidad (Karsulovic, 1994).

Los resultados medios de las maderas livianas están comprendidos según la estructura y proveniencia, entre 250 y 450 kg/cm<sup>2</sup> (Karsulovic, 1994).

Las maderas duras y densas tienen resistencias más elevadas, variando entre 400 y 700 kg/cm<sup>2</sup>. Las maderas muy duras pesadas pueden alcanzar resistencias que sobrepasan los 1000 kg/cm<sup>2</sup> (Karsulovic, 1994).

## 3. Influencia de algunos factores en la compresión axial

### a. Influencia de la humedad

La humedad tiene una gran influencia sobre la resistencia a la compresión siendo uno de los esfuerzos más sensibles a este factor. En promedio, la variación de resistencia es de 4% por 1% de variación de humedad.

En la práctica, se tienen corrientemente variaciones de 5% en el contenido de humedad, lo que implica variaciones de resistencia de hasta 20% (Karsulovic, 1994).

### b. Influencia de la textura

Se ha comprobado que mientras mayor es la proporción de madera de verano en la capa de crecimiento anual, mayor es la resistencia a la compresión (Karsulovic, 1994).

### c. Influencia de la densidad

Entre todas las propiedades resistentes de la madera, la resistencia a la compresión es la que está más íntimamente ligada a la densidad (Karsulovic, 1994).

En promedio, varía de 700 a 800 veces la densidad, correspondiendo los valores inferiores a las coníferas (Karsulovic, 1994).

## 4. Compresión transversal

### a. Ensayos y resultados

La madera es muy poco resistente en el sentido transversal. Este ensayo es muy difícil de realizar, puesto que si se somete una probeta a este tipo de compresión se alcanza muy rápidamente la zona de deformaciones plásticas. Si se traza un diagrama esfuerzosdeformaciones, la parte rectilínea es prácticamente inexistente, no existiendo casi período elástico. En un comienzo, hay una curvatura muy rápida entrándose luego a un período donde se produce una gran compactación bajo carga constante. En miembros cargados en compresión transversal, se observa que existe un rápido debilitamiento con el tiempo de aplicación de la carga, produciéndose el fenómeno de flujo plástico (fluencia). En seguida, la madera sufre una compactación aumentándose la resistencia considerablemente. Se hace así pues, muy difícil definir la ruptura, sin embargo, se acepta que ésta se produce en el punto donde la carga alcanza el valor constante (Karsulovic, 1994).

En general, los valores de resistencia a la compresión transversal varían entre 70 a 300 kg/cm<sup>2</sup> para maderas livianas y muy densas respectivamente (Karsulovic, 1994).

## 5. Influencia de algunos factores en la compresión transversal

### a. Influencia de la anisotropía

La relación entre la resistencia a la compresión axial y la compresión transversal varía entre cinco y seis en las resinosas de baja densidad, entre tres y cuatro para la de densidad media y entre dos y tres para las maderas densas. Se observa así que la anisotropía bajo el punto de vista de la compresión, es mucho menos marcada en las maderas densas que en las maderas de baja densidad (Karsulovic, 1994).

### b. Influencia de la dirección de carga respecto a los anillos de crecimiento.

En compresión transversal, existen diferentes valores de resistencia según la fuerza solicitante actúe en sentido tangencial o radial, respecto a los anillos de crecimiento (Karsulovic, 1994).

En general, las resinosas tienen una resistencia radial inferior a la tangencial. En cambio, en las latifoliadas ocurre lo contrario, la resistencia radial es mayor que la tangencial (Karsulovic, 1994).

La dirección de la fuerza a  $45^\circ$  es la más desfavorable, sobre todo en las resinosas, puesto que corresponde al plano de resistencia mínima, (deslizamiento a lo largo de las zonas de crecimiento) (Karsulovic, 1994).

### c. Compresión localizada

Se ha demostrado, mediante ensayos, que la localización de la acción de una fuerza transversal eleva considerablemente la resistencia de compresión transversal. (Las fibras vecinas de la zona de compresión participan a la resistencia de esta zona) (Karsulovic, 1994).

La localización del esfuerzo se encuentra en numerosos casos prácticos, especialmente en el ensamblado de piezas de cerchas, es decir, en el caso de piezas

comprimidas tomando apoyo sobre otras piezas, sea perpendicularmente u oblicuamente.

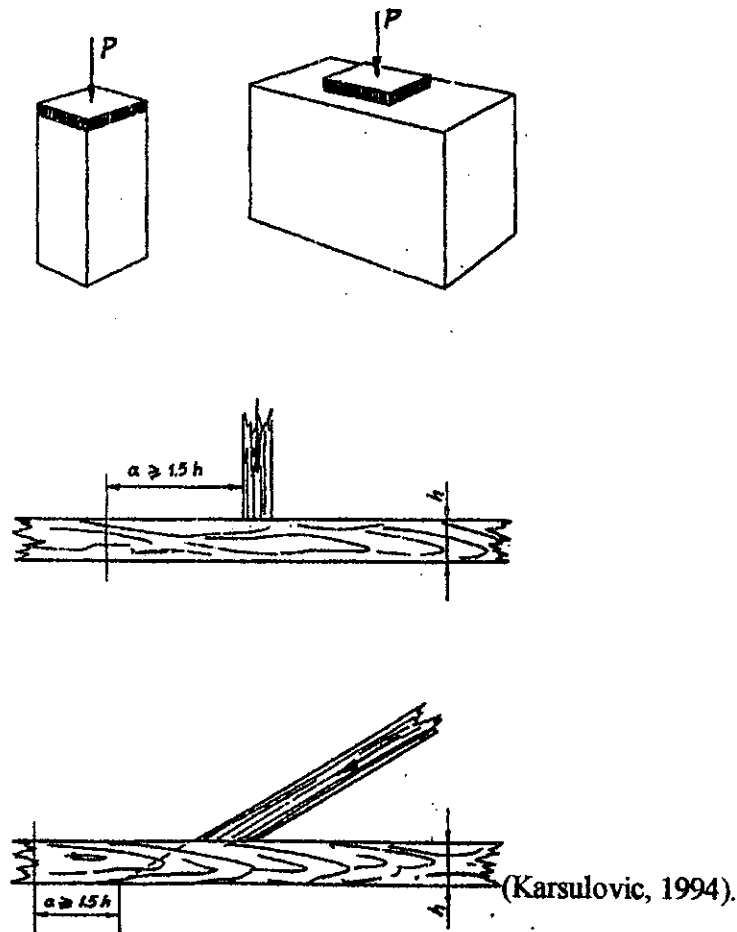
Mientras más desbordante es la pieza inferior de una a otra parte de la pieza en compresión, más elevada es la resistencia (Karsulovic, 1994).

En el empleo de la madera en la construcción, se debe tener en cuenta esta particularidad en el cálculo de elementos sometidos a compresión transversal (Karsulovic, 1994).

La zona de apoyo, debe ser lo más libre de defectos posibles y desbordantes de una parte a la otra de la localización de la compresión (Karsulovic, 1994).

La experiencia muestra que es necesario contar con un aumento de longitud de apoyo de por lo menos igual a 1,5 veces la altura de la pieza interesada (Karsulovic, 1994).

Figura No. 4 Tamaño mínimo de la longitud de apoyo según la pieza interesada.



## B. Resistencia a la flexión estática

La flexión es un esfuerzo compuesto, en el que intervienen al mismo tiempo esfuerzos de tracción, compresión y esfuerzos de cizalle o cortantes (Karsulovic, 1994).

La resistencia de materiales da una relación entre las cargas aplicadas y el esfuerzo de flexión, la que es obtenida sobre la base de ciertas hipótesis: deformaciones pequeñas, cuerpo homogéneo e isotrópico y módulo de elasticidad idéntico en tracción y compresión (Karsulovic, 1994).

Para el caso de la madera, esta fórmula no se ajusta a la realidad debido a que éste es un material anisotrópico, que presenta las siguientes características que le son propias:

- Los períodos elásticos en tracción y en compresión difieren ostensiblemente.
- Debido a la baja resistencia de la madera a la compresión transversal, la manera en que la pieza es cargada puede generar deformaciones locales importantes (caso de la viga cargada con una fuerza puntual central) (Karsulovic, 1994).
- El esfuerzo de cizallamiento longitudinal que da origen a la flexión, tiene para la madera, a diferencia de otros materiales, una gran importancia dado a la baja resistencia que ella presenta a este tipo de esfuerzo (Karsulovic, 1994).

### 1. Resultados de los ensayos

Para probetas pequeñas, los valores de esfuerzos de flexión son aproximadamente iguales al valor de la resistencia en tracción. Ello ocurre en razón a que la probeta se fractura en la zona traccionada (Karsulovic, 1994).

Se observa que la humedad tiene gran influencia en la flexión, sin embargo, su incidencia es menor que en compresión. En general, la variación de resistencia es del orden de 2% por cada 1% de variación en el contenido de humedad (Karsulovic, 1994).

El sentido de aplicación de la carga tiene influencia en el esfuerzo. En el sentido tangencial a los anillos de crecimiento, el esfuerzo es menor, en consecuencia es en este sentido que se efectúa el ensayo (Karsulovic, 1994).

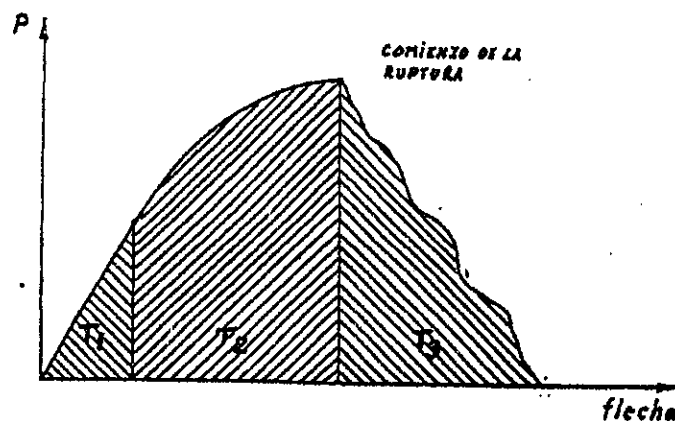
La velocidad de aplicación de la carga tiene gran importancia. Si la velocidad es elevada, se obtienen valores de esfuerzo también elevados (Karsulovic, 1994).

Cuando se está cerca de la ruptura, ésta se puede alcanzar sin incremento de carga después de cierto tiempo (por ejemplo, para una carga  $P$  igual a  $8/10$  de la carga de ruptura). Esto se debe al fenómeno de fluencia o flujo plástico del material (Karsulovic, 1994).

El gráfico carga-deformación en flexión muestra una parte rectilínea y después se encurva y la ruptura se produce. El área comprendida entre la curva y el eje de las  $X$  representa el trabajo gastado para producir la ruptura. El trabajo  $T_1$  es el trabajo absorbido en el límite elástico y  $T_2$  el trabajo absorbido en el período de deformación. Las maderas flexibles tienen un trabajo  $T_2$  grande y las quebradizas un  $T_2$  pequeño (Karsulovic, 1994).

Después de la ruptura, se produce un trabajo de desfibrado, justo hasta que se separen en dos trozos. Este es un trabajo  $T_3$  que mide la aptitud de la madera a absorber trabajo desde el comienzo de la ruptura. El trabajo total de ruptura viene dado entonces por la suma  $T_1 + T_2 + T_3$ . (Figura 5). (Karsulovic, 1994).

Figura No. 5. Gráfico carga - deformación en flexión



(Karsulovic, 1994).

## 2. Influencia de algunos factores en el esfuerzo de flexión

La resistencia a la flexión estática se deduce de un ensayo de flexión simple. Este ensayo se realiza sobre una probeta apoyada sobre dos apoyos y soportando en su centro una carga puntual que se incrementa gradualmente hasta la ruptura (Karsulovic, 1994).

### a. Influencia de los apoyos.

Para fin de los ensayos, se debe prever que los apoyos no penetren muy profundamente en la madera y no deben tampoco presentar una superficie de apoyo demasiado amplia (Karsulovic, 1994).

### b. Influencia de la escuadría.

En teoría, para una misma muestra, los ensayos de flexión sobre dos apoyos con carga central deberían dar los mismos valores de esfuerzo de flexión cualquiera sea la escuadría. Sin embargo, no ocurre así constatándose que a medida que la escuadría disminuye, el esfuerzo aumenta. Esto se debe a varias razones:

- La fórmula clásica de flexión que se aplica a la madera, no es válida en la ruptura (Karsulovic, 1994).

- En las probetas pequeñas, es más fácil obtener que éstas no tengan defectos y que las fibras sean exactamente paralelas al eje, lo que hace mucho más difícil de obtener en probetas de dimensiones mayores (Karsulovic, 1994).

- La penetración de los apoyos es mucho más fuerte en el caso de vigas de gran altura, donde  $P$  es elevada, produciendo perturbación por compresión transversal muy fuertes (Karsulovic, 1994).

- La influencia del esfuerzo cortante es mucho mayor en el caso de vigas de gran altura (Karsulovic, 1994).

### C. Resistencia al clivaje

El clivaje mide la resistencia de un material fibroso cuando la carga aplicada tiende a rasgarlo. Este es un ensayo característico para la madera y requiere de cierta técnica y probetas especiales para poder efectuarlo. La carga aplicada puede ser estática o dinámica y los valores obtenidos tienen el carácter de comparativos para las diferentes especies (Karsulovic, 1994).

El esfuerzo cortante es el que actúa tangencialmente a la superficie del material. Estos son generados por una acción directa de fuerzas al tratar de cortar al material donde son aplicadas y se define como fuerza sobre área. Un ejemplo más claro de tal esfuerzo es por ejemplo, cortar una hoja de papel con una tijera, la fuerza la proporciona la tijera tangencialmente a la hoja, y el área de interés sería el espesor de la hoja por el ancho de la tijera (Matzdorf, UVG 2003).

Los ensayos demuestran que la fuerza necesaria para provocar el clivaje es prácticamente proporcional al ancho de la sección de clivaje e independiente del largo de dicha sección (Karsulovic, 1994).

La resistencia al clivaje es muy influenciada por estado de la madera y el ensayo permite poner en evidencia las maderas anormales o que han sido sometidas a procesos especiales (Karsulovic, 1994).

### D. Dureza de la madera

La dureza indica una propiedad importante de la resistencia de la madera a la penetración de útiles de corte y resistencia al uso y desgaste.

El concepto de dureza está implícito en la madera al hablar de maderas duras y maderas blandas.

Dado la heterogeneidad de la madera, es difícil definir la dureza por un ensayo, puesto que para una misma probeta se tiene madera blanda de primavera y madera dura

de verano. Por otra parte, también se tienen variaciones de dureza según el sentido de la carga respecto a las fibras de la madera, es decir, habrá que diferenciar entre dureza normal o transversal y dureza axial.

El ensayo de dureza consiste en hacer penetrar en la madera una bolita o cilindro de acero. En consecuencia un ensayo de dureza axial es similar a un ensayo de compresión axial localizada, existiendo en efecto, una gran correlación entre estos ensayos. La madera más dura es la que resiste mejor a la compresión axial.

En Francia, haciendo uso de la propiedad antes señalada, se ha ideado un método de ensayo rápido que permite practicar en terreno una calificación de la madera, midiendo la dureza en sentido transversal preferentemente.

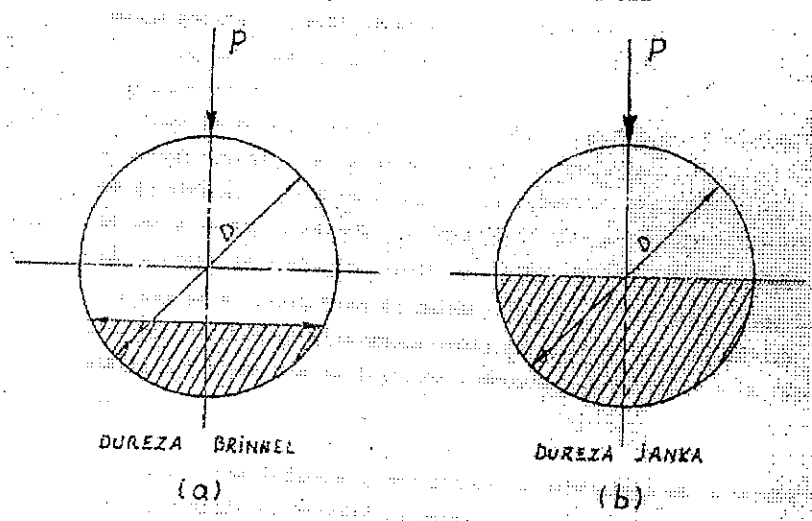
Entre los diferentes métodos de ensayos de dureza, los principales son los siguientes:

- Dureza Brinell (Figura a). Este método consiste en hacer penetrar una bolita de acero de 10 mm. de diámetro sobre la superficie de la madera por medio de una fuerza de 50 Kg. para las maderas duras y 10 Kg. para las maderas blandas. Se mide el diámetro de la marca dejada por la bolita, deduciéndose de aquí una cifra de dureza (en Kg. / mm<sup>2</sup>).

- Dureza Janka (Figura b). En este método se hace penetrar en la madera, justo hasta su diámetro una bolita de acero determinando la fuerza necesaria para ello. Esta fuerza es la que caracteriza la dureza superficial de la Madera.

- La dureza es afectada grandemente por la humedad de la madera puesto que es sabido que ésta se torna más plástica cuando la humedad aumenta. La madera saturada no tiene más de 1/3 a 1/4 de la dureza de la madera seca.

Figura No. 6 Diagrama de prueba para determinación de dureza



(Karsulovic 1994)

## E. Influencia de algunos factores en las propiedades mecánicas

### 1. Fenómeno de fluencia o flujo plástico de la madera

Cuando una pieza de madera está sometida a la acción de cargas permanentes de gran duración, se produce en ciertos casos una deformación continua de la pieza, este fenómeno se denomina fluencia del material o fenómeno de flujo plástico. Por ejemplo una viga cargada fuertemente, pero inferior a la carga de ruptura, puede ir tomando con el tiempo flechas cada vez mayores, pudiéndose llegar después de un cierto período hasta la ruptura (Karsulovic, 1994).

Este fenómeno no es particular de la madera pero es particularmente marcado en este material y los materiales fibrosos en general (Karsulovic, 1994).

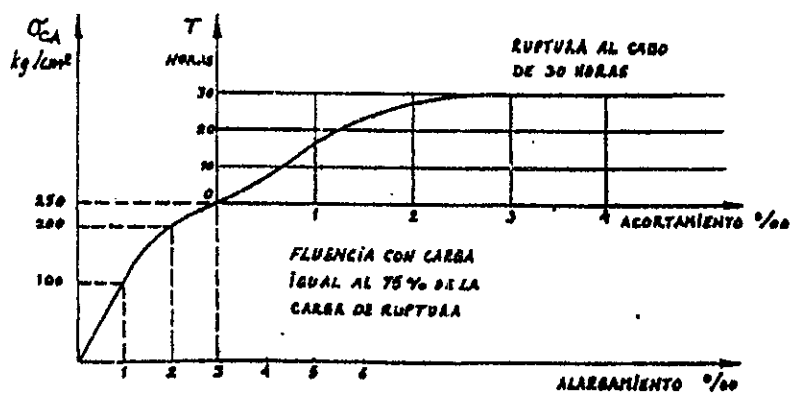
Los ensayos de fluencia en la madera han mostrado los siguientes resultados:

- Fluencia en la tracción axial: Este fenómeno no es significativo en la tracción de la madera cuando la carga es tal que el esfuerzo se mantiene por debajo del límite elástico. Más allá, la ruptura se puede producir bajo carga inferior a la carga normal de ruptura, si la carga es aplicada durante un tiempo suficientemente largo (Karsulovic, 1994).

- Fluencia en la compresión axial: En este caso, la fluencia se observa claramente desde que se sobrepasa el límite elástico y tanto más se incrementa mientras se aproxima a la ruptura (Karsulovic, 1994).

Existe una influencia marcada de la naturaleza de la madera y del contenido de humedad de ésta.

Figura No. 7 Fenómeno de fluencia



(Karsulovic, 1994).

- Fluencia en la torsión: El ángulo de torsión aumenta sensiblemente bajo una cupla constante. Después de un cierto tiempo, el ángulo se estabiliza a un cierto valor que puede ser el doble del ángulo inicial, en el momento de la aplicación de la cupla. Esta fluencia es debida al deslizamiento relativo de las fibras (Karsulovic, 1994).

- Fluencia en la flexión: Es en la flexión donde la fluencia se hace más evidente, bajo cargas relativamente bajas (produciendo esfuerzos del orden de  $100 \text{ kg/cm}^2$ ), se constata ya aumentos de flechas (Karsulovic, 1994).

Este aumento se produce en un comienzo bastante rápido y después más lentamente tendiendo hacia un valor límite. Al extremo de un mes, por ejemplo, se obtiene una estabilización de la flecha llegando en algunos casos a alcanzar alrededor de una vez y medio el valor inicial (Karsulovic, 1994).

Para cargas más elevadas (produciendo esfuerzos del orden de 300 kg/cm<sup>2</sup> o 3/4 del esfuerzo de ruptura), la fluencia es rápida al comienzo, después decrece y se estabiliza. Al cabo de varios meses, la flecha puede alcanzar hasta dos veces y medio el valor inicial. Algunas veces, se puede llegar incluso a la ruptura de la pieza para períodos bastante más largos de cargas (Karsulovic, 1994).

Por numerosas experiencias realizadas en diversos laboratorios, se puede concluir:

- La fluencia es notoria para todas las sollicitaciones en el caso de cargas relativamente elevadas, más allá, por ejemplo de la mitad de la carga de ruptura (Karsulovic, 1994).

- Para cargas elevadas, cercanas a 0,8 ó 0,9 grados de los esfuerzos de rupturas, la fluencia puede producir la ruptura de las piezas si la experiencia se prolonga por un tiempo suficiente (Karsulovic, 1994).

Cabe hacer notar, por último, que en el empleo de la madera en la construcción, se debe tener presente el fenómeno de fluencia para evitar flechas exageradas de las vigas. En la práctica, se construyen las vigas con contra flechas y se calculan las piezas con un módulo de elasticidad reducido en un cierto porcentaje a modo de compensar este fenómeno (Karsulovic, 1994).

## 2. Influencia de los defectos o anomalías de la madera

### a. Consideraciones generales

Se consideran como defectos de la madera desde el punto de vista resistente, a todas las anomalías de su estructura que perjudiquen sus propiedades mecánicas (Karsulovic, 1994).

En general, los defectos más comunes son los siguientes:

- Nudos
- Fibra torcida
- Grietas, rasgaduras, hendiduras
- Bolsas de resina
- Madera de reacción
- Defectos del duramen o corazón
- Defectos de los anillos

De entre los citados defectos, los que más inciden en la resistencia de la madera son los nudos, la inclinación de la fibra y las grietas y rasgaduras.

Basadas en las propiedades resistentes de la madera y su aspecto (especialmente dimensiones de nudos, dimensiones de grietas y rasgaduras y ángulo de inclinación de las fibras), existen ciertas reglas de clasificación que determinan cual es la más adecuada para un determinado uso (Karsulovic, 1994).

### 3. Efecto de los nudos

Cabe recordar primeramente que los nudos producidos por el crecimiento de las ramas, distinguiéndose dos tipos: nudos muertos y nudos vivos; en los primeros no existe continuidad de las fibras y se producen por una mala poda (por no cortar la rama en su unión con el tronco), en los segundos hay continuidad de las fibras y se deben a la conformación natural del árbol. En las coníferas, los nudos se presentan agrupados casi

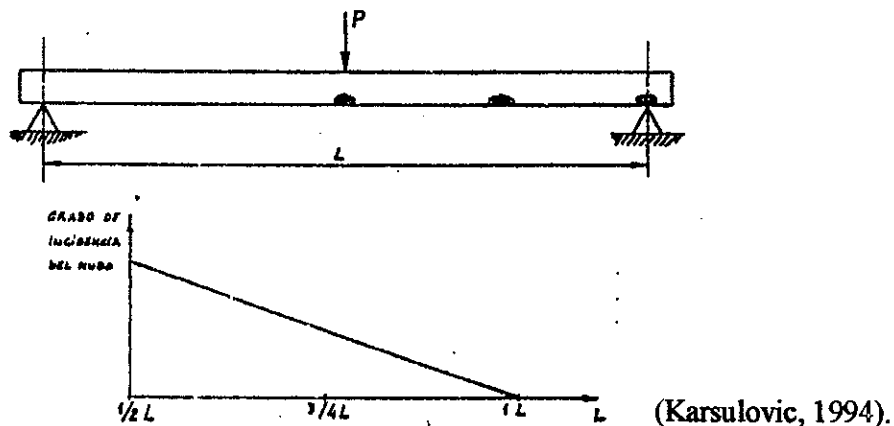
a un mismo nivel, mientras que en las latifoliadas están repartidos indistintamente (Karsulovic, 1994).

Los nudos se clasifican según su tamaño en: muy pequeños, pequeños, medianos y grandes, dependiendo sus medidas de la norma que se esté usando (Karsulovic, 1994).

Los nudos afectan la resistencia porque las fibras de la madera se distorsionan al pasar alrededor de ellos, llegando a tornar las fibras en direcciones casi normales a la de la madera adyacente. El efecto de un nudo sobre las propiedades de resistencia de una pieza depende del tamaño, forma, adherencia y localización de los nudos, siendo mayor o menor su influencia según sea el tipo de esfuerzo a que se someta (Karsulovic, 1994).

La disminución de resistencia de una pieza debido a la presencia de nudos, es mayor cuando la pieza está sometida a tracción más bien que a compresión y la influencia sobre la resistencia a la flexión, depende especialmente de la localización en el sentido longitudinal y transversal y del área que ocupa el nudo en la sección transversal de la pieza (Karsulovic, 1994).

Figura No. 8 Influencia de los nudos en la resistencia.



En una viga simplemente apoyada, un nudo en la cara inferior (que está en tracción) será mucho más incidente en la resistencia que nudos en la cara en compresión. Nudos en el eje neutro o en la zona de esfuerzo cortante máximo, tienen muy poco efecto sobre la resistencia (Karsulovic, 1994).

Para el caso de columnas cortas o intermedias, los nudos reducen la resistencia en función de su posición y tamaño, pero en columnas largas donde la rigidez es el factor importante, los nudos no tienen demasiada importancia (Karsulovic, 1994).

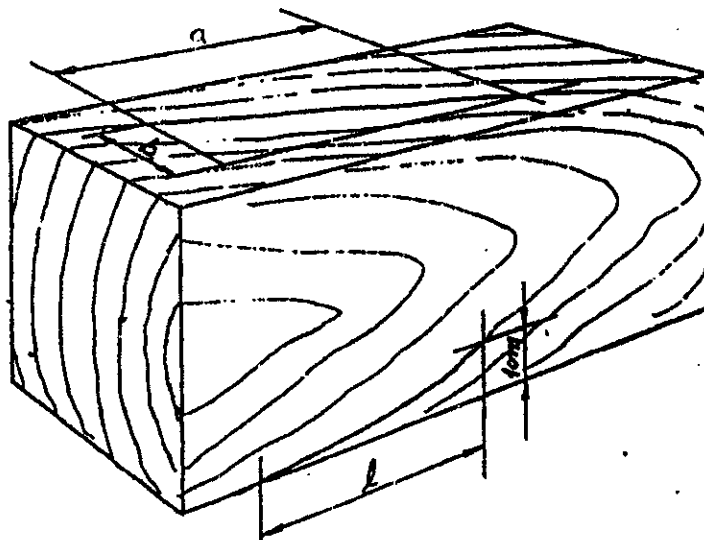
#### 4. Efecto de la inclinación de las fibras

Las fibras torcidas es una anomalía de crecimiento que se traduce por una desviación de las fibras en relación al eje longitudinal del árbol (Karsulovic, 1994).

Cuando existen fibras oblicuas, los esfuerzos axiales de tracción tendrán componentes normales a estas, cuyos valores serán inferiores a los correspondientes a fibras rectas. El caso extremo se tiene cuando las fibras son prácticamente transversales, caso que corresponde a un esfuerzo mínimo (Karsulovic, 1994).

La inclinación de las fibras se puede expresar como una relación entre la desviación de 1 cm. referida al canto de la pieza, y la distancia en que tal desviación ocurre, o bien determinando la pendiente como se muestra en la figura (Karsulovic, 1994).

Figura No. 9 Influencia de la inclinación de las fibras



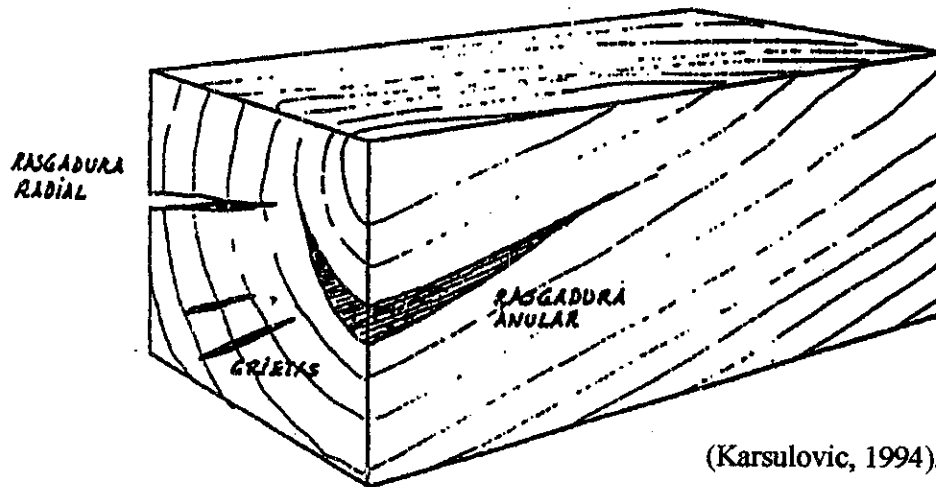
(Karsulovic, 1994).

## 5. Influencia de las Grietas y Rasgaduras

La incidencia de este tipo de defectos (figura 10) sobre una pieza, es particularmente importante cuando ésta está sometida a cargas de flexión pudiendo disminuir considerablemente la resistencia al esfuerzo cortante o cizalle longitudinal. La magnitud de su influencia dependerá del área de la sección longitudinal que ellas cubren (Karsulovic, 1994).

Este tipo de defectos también afecta la resistencia de un elemento sujeto a tracción normal a las fibras, y prácticamente no tiene mayor incidencia cuando la tracción es axial y las fibras son rectas (Karsulovic, 1994).

Figura No. 10 Influencia de las grietas y rasgaduras

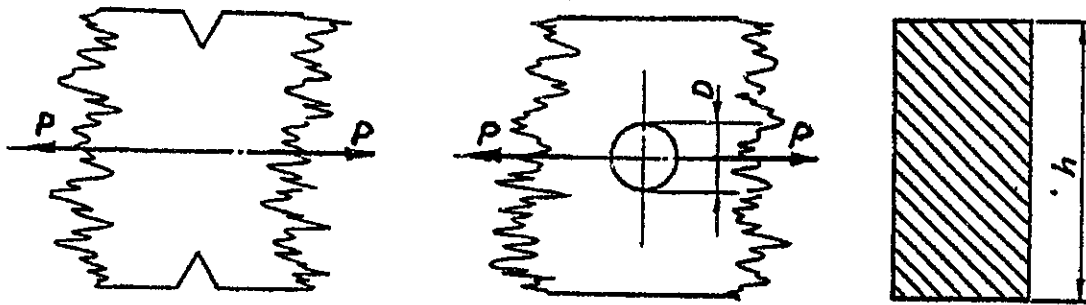


(Karsulovic, 1994).

## 6. Influencia de los entalles y perforaciones

Todo entalle o perforación tiene por efecto reducir la sección resistente de una pieza e inducir concentración de esfuerzos. En la Figura 10, se muestran una pieza entallada y otra perforada sometida a un esfuerzo de tracción (Karsulovic, 1994).

Figura No. 11 Influencia de los entalles y perforaciones



(Karsulovic, 1994).

Evidentemente, el efecto del entalle y de las perforaciones dependerá de la profundidad y del diámetro, respectivamente. Para los casos que se muestran en la Figura 10, los ensayos demuestran que para profundidades de entalles que comprendan entre el 25 y 50% de la altura  $h$  de la sección transversal, la disminución de resistencia a la ruptura varía entre 30 y 40%; se observa también que en el caso de perforaciones centrales que reduzcan  $h$  en iguales porcentajes, la resistencia de ruptura se ve disminuida entre 15 a 20% (Karsulovic, 1994).

La influencia de los entalles y perforaciones demuestran que es prácticamente imposible de utilizar plenamente la resistencia propia de tracción de la madera, pues estos se encuentran presentes en la mayoría de los tipos de ensamblados y uniones (Karsulovic, 1994).

La influencia de los entalles se manifiesta igualmente, pero en menor magnitud en la resistencia a la compresión. Siendo la madera más plástica en compresión, las concentraciones de esfuerzos son menos importantes, pero en ningún caso despreciables (Karsulovic, 1994).

## 7. Influencia de la temperatura

La determinación de la variación de la resistencia causada por los cambios de temperatura son difíciles de determinar, debido a los múltiples cambios que ésta provoca: alteración de la humedad y su distribución, aparición de fuerzas internas, defectos como rasgaduras y grietas, aumento de dureza superficial y cambios químicos, si la temperatura es muy alta (Karsulovic, 1994).

Desde el punto de vista físico, los coeficientes de dilatación de la madera en sentido paralelo a las fibras son mucho menores que en el caso de los metales, pero por el contrario, en el sentido transversal, estos son más elevados. Debe considerarse que, al mismo tiempo que se producen las dilataciones, se producen en la madera contracciones dado que disminuye el contenido de humedad cuando la temperatura aumenta, de manera que prácticamente las variaciones de dimensión por temperatura, son prácticamente despreciables (Karsulovic, 1994).

Se demuestra que las propiedades resistentes de la madera se reducen cuando se la calienta, siendo esta disminución mayor para madera húmeda que para madera seca. Esto se explica teniéndose presente que la plasticidad de la madera, especialmente de su componente lignina, crece a medida que la temperatura sube (Karsulovic, 1994).

La influencia de la temperatura es más o menos importante según el tipo de esfuerzos que se trate. Para madera seca, la resistencia a la compresión decrece linealmente con el aumento de temperatura hasta los 150°C a 160°C. Más allá de 160°C, la madera comienza a destilar y a degradarse la lignina, no pudiéndose hablar ya de resistencias mecánicas normales (Karsulovic, 1994).

Las maderas densas tienen una disminución de resistencia más pronunciada con la temperatura que las maderas menos densas (Karsulovic, 1994).

Cuando la madera esta húmeda, la resistencia disminuye con la elevación de temperatura pero no sigue una relación lineal (Karsulovic, 1994).

Análogamente al caso de compresión, la resistencia a la flexión disminuye cuando la temperatura aumenta, por ejemplo, para una madera de pino a 12% de contenido de humedad., si se baja la temperatura desde 20°C a - 20°C, existe un aumento de resistencia del orden de 1% por cada grado de variación de temperatura (Karsulovic, 1994).

En la resistencia a la flexión por impacto, se ha observado que el trabajo de ruptura es prácticamente duplicado cuando se pasa de una temperatura superior a 0° a la temperatura de -30°C (Karsulovic, 1994).

## VI. Descripción botánica de las especies a trabajar

### A. Dulce Quemado (*Phoebe mexicana*)

Este es un árbol de 9 a 12 metros, a veces más pequeño, el tronco tiene hasta 25 cm. de diámetro, las ramas son fulventosas al principio, luego glabras; las hojas en pecíolos de 1 a 3 cm. de largo, coriáceas o cartáceas, estrechamente ovadas a ovadas lanceoladas, o elípticas lanceoladas, la mayoría tienen de 11 a 20 cm. de largo y 4 a 8 cm. de ancho, la mayoría son abruptamente acuminadas, o largas acuminadas, finas en la base, usualmente trinervadas, barbadas en las axilas de las nervaduras, y en cualquier otro lado glabras, oscuras y dispersamente, seríceas. Las venas son prominentemente reticuladas por debajo; la inflorescencia es densamente pilosa, blancuzca o serícea, con muchas flores, panículas piramidales, pedunculadas, e igual o más pequeñas que las hojas, los pedicelos tienen de 2 a 3 mm. de largo; las flores son blancas o blancuzcas, densamente pilosas, de 3 mm. de largo; el periantio tiene un tubo obsoleto, los segmentos son iguales, ovados, finos y suberectos; los filamentos son más o menos igual a las anteras, dispersamente pubescentes, los de la tercera serie con dos glándulas basales más largas, subglobosas, sésiles; las anteras son glabras, alargadas ovadas; la estaminoidea es larga, acuminada, muy poco pubescente en el dorso, con el estipe corto y piloso; el ovario es glabro, globoso, el estilo es de dos a tres veces más largo, delgado, el fruto es elipsoide, con 12 mm. de largo y 7 mm. de ancho.

### B. Cola de Pava (*Cupania guatemalensis*)

Un gran arbusto o un árbol, generalmente de 9 a 12 metros, el tronco puede ser de 25 cm. de diámetro o menos, a menudo trilobado, la corteza es café o grisácea a verdosa, suave, la corteza interna es café; las ramas jóvenes son densamente tomentosas o suavemente pilosas, tienen de 6 a 10 hojas, en su mayoría alternadas, oblongas-lanceoladas, u oblanceoladas oblongas, de 5 a 15 cm. de largo y 2 a 5 cm. de ancho, obtuso o fino, anchamente agudas a atenuadas en la base, más o menos dentadas o subenteras, membranosas cartáceas, pilosas en el envés al principio, y luego glabras conforme pasa el tiempo, por debajo es densamente velutino pilosa; las panículas axilares, usualmente pequeñas y de 10 cm. o menos de largo, con pocas ramas,

densamente tomentosa, las brácteas tubuladas, con 2 a 3 mm de largo, pedicelos de 1 mm de largo; los sépalos casi de 3 mm. de largo, tomentulosos; pétalos blancos, de 3 mm. de largo, unguiculados, velludos en el margen; la cápsula es anchamente triquetra turbinada, de 1.5 cm de largo, atenuada o abruptamente contraída, cartáceas, por fuera es suavemente pilosa, densa y glandular por dentro; las semillas son de casi 1 cm. de largo.

### C. Chirico (*Licania arborea*)

Un árbol mediano a grande, a veces hasta 30 metros de altura, pero usualmente es más pequeño, las ramas son glabras; las hojas, en su mayoría, son ovadas a oblongas y anchas, de 9 a 18 cm. de largo, coriáceas, bastante redondeadas en el ápice, obtusa a subcordadas en la base, glabras y lustrosas por debajo, blancuzcas por debajo, y cubiertas con un diminuto tomento cerrado, los nervios laterales son delgados, muy prominentes, las últimas venas son reticuladas; las flores son pequeñas, blancas, generalmente en panículas largas y muy ramosas, las cuales son tomentosas de color café; los sépalos son apenas mayores de 1 mm. de largo; los pétalos tienen aproximadamente 1.2 mm de largo y la mitad de ancho, ciliados y caduceos; filamentos velludos; el fruto es obovoide u oblongo-obovoide, de 2 a 3 cm. o más de largo, los cuales contienen una sola semilla alargada.

## VII. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de esta investigación, se siguió el procedimiento establecido por las normas ASTM, designación D 143, revisado y adoptado en el año 1983, el cual indica los métodos estándar para la realización de pruebas físicas y mecánicas de madera, que se describe a continuación.

### A. Identificación de la especie forestal

Se realizó una gira de campo hacia el área en donde se obtuvieron las muestras de madera para coleccionar muestras botánicas tales como hojas, flores, frutos y corteza. Con este material y con datos obtenidos de inventarios realizados previamente en el área, se identificaron las especies de los árboles a trabajar. Para esto, se contó con la colaboración de la Doctora Elfriede de Pöhl, encargada del Herbario de la Universidad del Valle de Guatemala, quien por medio de la Flora de Guatemala, revisó las características de las muestras que se le presentaron y determinó (o corroboró) las especies de las mismas.

### B. Selección y número de árboles

La madera necesaria para la realización de las pruebas se obtuvo en finca La Firmeza, propiedad de Maderas El Alto, ubicada en el municipio de Morales, Izabal. Se hizo una gira de campo a dicho lugar, en donde se seleccionaron los árboles a trabajar.

Se escogieron cinco árboles de cada especie a trabajar, de los que se tomaron bolillos de 1.20 m. de longitud, uno de la base de cada árbol, y otro de la parte más alta, de tal forma que proporcionaran información de la variación de las propiedades con respecto a la altura, y así los datos fueran más representativos de la especie.

### C. Marcado en el campo

Se designó cada árbol con un número arábigo (1, 2, 3, etc.) y las trozas para muestras con letras minúsculas. Se determinó la posición del norte magnético y se marcó en la

corteza del tronco. Se cortaron las trozas que se eligieron y se trasladaron hacia un lugar donde fueron almacenadas.

#### D. Transporte del material

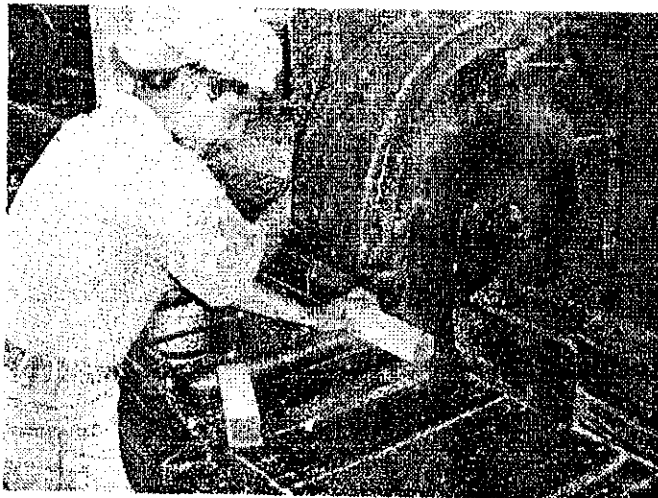
La madera obtenida se transportó en un camión cerrado, desde la bacadilla de la finca, hasta el aserradero en donde fueron almacenadas y cortadas las piezas de madera a trabajar. La distancia recorrida fue de 250 Km. lo que se realizó en un día.

Las piezas de madera fueron colocadas bajo sombra para evitar pérdidas excesivas de humedad por exposición al sol, y se apilaron sobre tarimas para que no tuvieran contacto con el suelo.

#### E. Corte y preparación de las probetas.

Las probetas para las pruebas, se cortaron conforme se iban realizando las pruebas, lo cual se hizo con una sierra de banco y una sierra despuntadora. Se tuvo cuidado de obtener probetas que representaran las diferentes distancias desde el centro del árbol hacia el exterior, respetando el número indicado por las normas ASTM. Las probetas fueron marcadas adecuadamente para facilitar su identificación en el laboratorio.

Figura No. 11. Corte de Probetas en aserradero



## F. Descripción de los ensayos

De los bolillos de 1.20 m. antes mencionados, provinieron las probetas que se usaron para los ensayos físicos y mecánicos. Estos ensayos tienen dimensiones normalizadas. Las pruebas realizadas fueron:

1. Flexión estática (módulo de elasticidad y módulo de ruptura)
2. Compresión paralela a la fibra
3. Compresión perpendicular a la fibra
4. Corte paralelo a la fibra
5. Dureza
6. Peso específico
7. Contracción volumétrica (tangencial, radial y axial)
8. Contenido de humedad \*

### 1. Flexión estática

#### a. Descripción

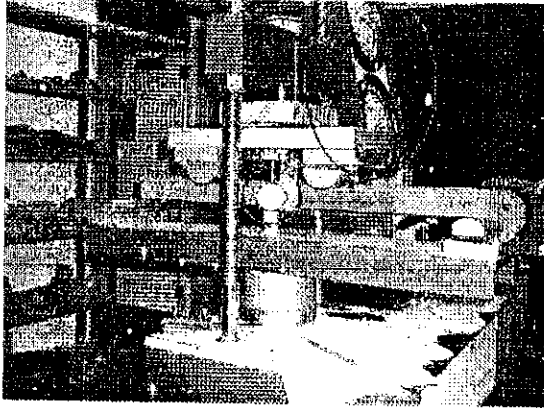
Para realizar esta prueba, se escogió una probeta de cada par de barras por cada troza. Este par consistió de dos barras adjuntas y equidistantes en una misma distancia del centro. Las dimensiones de la probeta fueron de 2 x 2 x 30 pulg.

#### b. Procedimiento

La carga se aplica al centro de la probeta. Para cada intervalo de carga (cada 100Kg), se miden las deflexiones al centro de la probeta por medio de un deflectómetro el cual tiene una escala medida en pulgadas y a su vez abarca 1 pulgada.

\* Para cada árbol, todas las pruebas fueron realizadas conjuntamente, por lo que la humedad de cada prueba de propiedades mecánicas se asumió que era igual a la obtenida en la determinación de las propiedades físicas.

Figura No. 12 Máquina usada en la determinación de Flexión Estática. Se observa la ubicación del deflectómetro y la escala de carga aplicada



Se dibuja por cada prueba una gráfica de carga contra deformación (Ver anexos 1, 2 y 3) y se anotan todos los detalles que se consideren son importantes.

Hay que determinar el módulo de elasticidad y el esfuerzo máximo o módulo de ruptura.

Para la determinación del Módulo de Elasticidad, se hace uso de la siguiente fórmula:

$$E = (Pa / 24 \Delta) * (3L^2 - 4a^2),$$

donde:

$I = b \text{ (base)} * h \text{ (altura)}^3 / 12 = \text{constante (in}^4\text{)}$

$P = \text{carga aplicada (lb.) (lectura universal)}$

$L = \text{distancia entre apoyos, en este caso sería } L/3 \text{ (in)}$

$\Delta = \text{deformación (in) (lectura del deformímetro).}$

Se calcula E para cada lectura de P y  $\Delta$  dadas, idealmente los resultados obtenidos de cada operación deberían ir aumentando conforme aumenta la deformación como se observa en la gráfica del módulo de elasticidad. Luego se grafican los valores de cargas contra deformación, se hace una regresión lineal y la pendiente de esta gráfica es el Módulo de elasticidad.

El módulo de ruptura (MOR) es un equivalente al esfuerzo que hace fallar a un material. Está en función del momento del centroide de la sección transversal de la viga y del momento de inercia de esta.

La fórmula que se usa para determinar el módulo de ruptura es la siguiente:

$$\text{MOR} = My / I,$$

donde:

$$M = Pa$$

$$y = h/2$$

$$I = bh^3 / 12$$

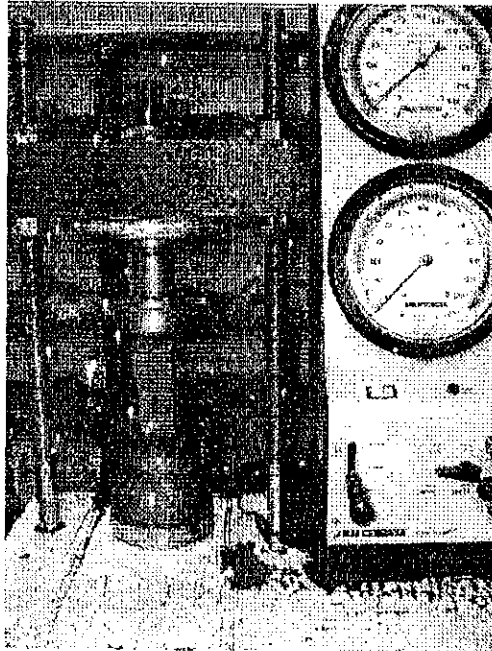
(b = base, h = altura)

## 2. Compresión paralela a la fibra

### a. Descripción

Para realizar este ensayo, se tomó una probeta por cada barra de cada troza. Las dimensiones de las probetas son de 2 x 2 x 8 pulg. Antes de realizar el ensayo correspondiente, se determinaron las dimensiones reales de la probeta, utilizando un vernier.

Figura No. 13 Disposición de la probeta para la obtención de la compresión paralela a la fibra.



## b. Procedimiento

Se determinó la carga última, es decir, la carga cuando falla la viga, esto solamente se calculó una vez con cada muestra.

La fórmula que se usa es la misma usada para determinar el módulo de ruptura.

- Tipos de fallas que se dan en el ensayo de compresión paralela

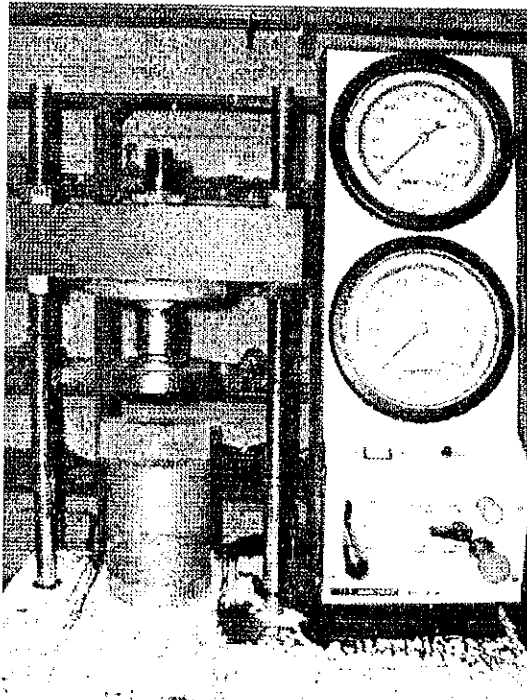
- Aplastamiento: este término es usado cuando el plano de ruptura es aproximadamente horizontal.
- Falla en forma de cuña: la dirección de la grieta en el plano (radial o tangencial) puede ser notada.
- Corte: este término se usa cuando el plano de ruptura marca un ángulo con la horizontal de aproximadamente 45°.
- Rajadura: este tipo de falla usualmente ocurre cuando existen defectos internos anteriores a la prueba.
- Compresión y corte paralelo a la fibra: esta falla usualmente ocurre en probetas de fibra cruzada. Y se dan por no seguir las especificaciones con relación a las características que definen las probetas.
- Final enrollado: este tipo es usualmente asociado con un exceso del contenido de humedad en los bordes de la probeta, corte impropio de la probeta o ambos. No es un tipo de falla aceptable.

## 3. Compresión perpendicular a la fibra.

### a. Descripción

Las dimensiones de las probetas para esta prueba son de 2 x 2 x 6 pulg. Antes de efectuar el ensayo, se determinaron las dimensiones reales y el peso de la probeta.

Figura No. 14 Disposición de la probeta para la obtención de la compresión perpendicular a la fibra.



b. Procedimiento

Se mide la carga que produce una deformación de 2.5 mm., en la probeta y se detiene la prueba. Esta se toma como la carga máxima, a menos que la falla ocurriera antes de esa deformación.

El máximo esfuerzo se toma como:

$$F_c = P / A,$$

donde

$F_c$  = esfuerzo máximo a compresión perpendicular.

$P$  = carga máxima o carga para una deformación de 2.5 mm.

$A$  = área de esfuerzo (4 pulg<sup>2</sup> aprox.)

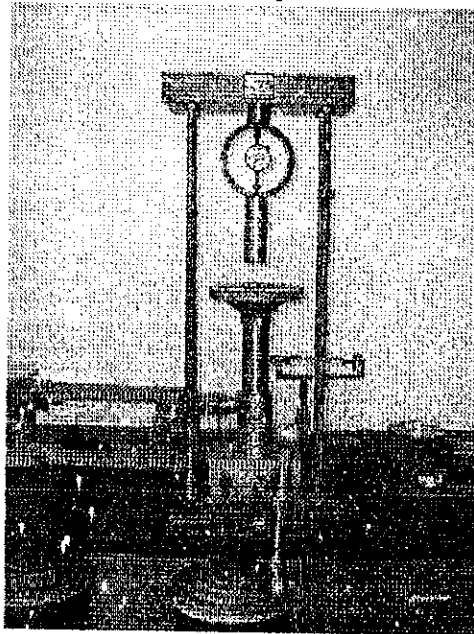
#### 4. Corte paralelo a la fibra

##### a. Descripción

Se obtuvieron 12 probetas por cada troza. Estas probetas se cortan por pares, una de ellas es para ser probada en la dirección radial y la otra para ser probada en la dirección tangencial.

Se seleccionaron las barras de tal forma que una proviniera de la parte del duramen de la troza, otra de la albura y cuatro representativas en cada troza.

Figura No. 15 Máquina usada para la determinación de corte paralelo a la fibra



##### b. Procedimiento

La probeta se introduce dentro de un dispositivo diseñado especialmente para provocar el corte. Se lee la carga para la cual la probeta falla, es decir, en el momento que el dispositivo rasga la parte de la pieza de madera que está presionando.

El esfuerzo de corte es:

$$F_v = P/A,$$

donde:

P = carga máxima.

A = área de corte (aproximadamente 25 cm<sup>2</sup>).

F<sub>v</sub> = esfuerzo de corte.

## 5. Dureza

Se obtuvieron 12 probetas por cada troza. Estas probetas se cortan por pares, una de ellas es para ser probada en la dirección radial y la otra para ser probada en la dirección tangencial.

Se seleccionaron las barras de tal forma que una proviniera de la parte del duramen de la troza, otra de la albura y cuatro representativas en cada troza.

### a. Descripción

Para la realización de esta prueba, se tomaron las muestras que sobraron de las pruebas anteriores y se les aplicó el procedimiento para la determinación de los datos.

### b. Procedimiento

Se utiliza un dispositivo especial para la prueba y la probeta se coloca sobre una base de apoyo. Este dispositivo especial (que se ajusta a la máquina de ensayos), utiliza una esfera de acero cuyo diámetro es 11.75 mm. y que se penetra 2.44 mm. en la madera para determinar la carga necesaria para introducir la esfera a esa profundidad.

Se efectúan dos penetraciones en la cara tangencial y dos penetraciones en la cara radial. Se hacen lo suficientemente separadas para obtener un buen promedio, pero separadas de los extremos para evitar el astillamiento.

## 6. Peso específico

Según la norma ASTM D-143, para todos los ensayos en donde se efectuaron mediciones de peso y contenido de humedad, la precisión debió ser no menos del 0.2%. Para la obtención de las dimensiones de cada probeta, se usó un calibrador digital de marca Scala messzeuge, el cual tiene un margen de error de 0.005 mm y 0.0005 pulg.

Todos los aparatos usados para obtener los datos, deberán ser calibrados a intervalos suficientemente frecuentes para asegurar la precisión en las medidas.

### A. Descripción

Se usaron diez probetas para la determinación de peso específico. Estas se seleccionaron así cuando fue posible: dos del centro del árbol, dos de la parte más alejada del centro y 6 de la parte media. Para esta prueba, la madera debía estar en la condición verde (más de un 30% de humedad). Las dimensiones de las probetas fueron de 1 x 4 x 1 pulg.

### b. Procedimiento

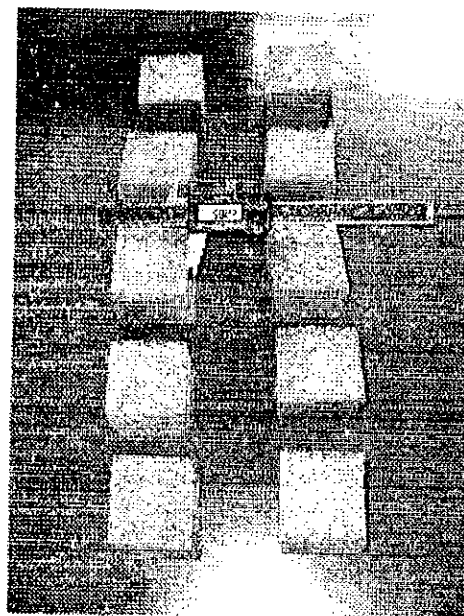
Se hacen estas determinaciones con un contenido de humedad mayor del 30% (secado al aire) y en condiciones de secado al horno (contenido de humedad 0%). También se realizaron estas mediciones luego de sumergir las probetas durante 24 horas en agua.

Cuando estaban en condición verde, se pesó la probeta y el volumen se determinó midiendo sus tres planos. Se apiló esta probeta verde y se secó al horno hasta que obtuviera un peso constante. Cuando esto sucedió, se midió la probeta y se determinó el volumen.

Figuras No. 16 Balanza usada para determinar el peso de las probetas (a), y vernier empleado para determinar el volumen (b)



(a)



(b)

Para la determinación de peso específico aparente verde y peso específico aparente seco, se hizo uso de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Peso específico, aparente verde} = \frac{\text{PESO VERDE}}{\text{VOLUMEN VERDE}}$$

$$\text{Peso específico aparente seco} = \frac{\text{PESO SECO}}{\text{VOLUMEN VERDE}}$$

El peso específico a 12% de contenido de humedad se determinó mediante una gráfica de densidad contra humedad, por medio de la ecuación de regresión, ya que también se contó con el dato de volumen y peso de las probetas al ser sumergidas en agua durante 24 horas.

## 7. Contracción volumétrica (tangencial, radial y axial)

Se usaron los datos que se obtuvieron en la prueba de peso específico, con las siguientes fórmulas:

$$\text{Contracción volumétrica} = \frac{(\text{Vol. verde} - \text{Vol. seco}) \times 100}{\text{Volumen Verde}}$$

$$\text{Contracción tangencial} = \frac{(\text{long. T verde} - \text{long. T seca}) \times 100}{\text{long. T verde}}$$

$$\text{Contracción radial} = \frac{(\text{long. R verde} - \text{long. R seca}) \times 100}{\text{long. R verde}}$$

$$\text{Contracción axial} = \frac{(\text{long. A verde} - \text{long. A seca}) \times 100}{\text{long. A verde}}$$

## 8. Contenido de humedad

Al igual que en la prueba anterior, este dato se obtiene con los resultados de la prueba de peso específico, aplicando la fórmula siguiente:

$$\text{Contenido de Humedad (C.H.)} = \frac{(\text{Peso verde} - \text{Peso seco}) \times 100}{\text{Peso verde}}$$

## G. Determinación de esfuerzos básicos

Los esfuerzos básicos representan la resistencia permisible de la madera en piezas libres de defectos y sanas. Por esto, a la hora de someter una madera a esfuerzos de resistencia, se deben manejar estos datos. Estos se aplican a los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades mecánicas. Se calculan multiplicando los valores de esfuerzos de resultados de ensayos por factores de corrección que toman en cuenta:

1. La variabilidad de la resistencia de la madera;
2. La disminución de resistencia de la madera por efecto de carga permanente durante un período largo de tiempo;

3. Grado de sazónamiento (disminución de la humedad) de la madera analizada y
4. Factor de seguridad que toma en cuenta la posibilidad de sobrecargas accidentales y la influencia de otros factores no previstos.

Se reconoce que algunos esfuerzos, principalmente los de compresión paralela y flexión, se incrementan al secar la madera (ensayos de piezas pequeñas), pero no es recomendable incrementar los esfuerzos básicos para madera seca (piezas mayores de 10 cm de grosor) porque se consideró que buena parte de la madera utilizada en construcción, se coloca verde o poco sazónada y aunque se pusiera seca antes de utilizarla, la pérdida de humedad va acompañada de agrietamientos y combamiento, defectos que contrarrestan el incremento de resistencia debido al secado.

Debido a estas consideraciones, se decidió reducir los esfuerzos básicos, tomando en cuenta la humedad contenida promedio de las maderas analizadas.

El procedimiento para calcular los factores de corrección utilizados para los esfuerzos básicos es:

#### 1. Factor de corrección por variabilidad

$$V = 1 - C \frac{v}{100} \qquad v = \frac{S}{X} 100$$

V = factor de corrección por variabilidad de resultados

v = coeficiente de variación en %

S = desviación normal o estándar

C = coeficiente con valor de 1.0 a 1.5 dependiendo de la dispersión de los valores observados y la forma de su distribución, en este trabajo se tomó como 1.0.

Los coeficientes de variación (v) se aproximaron a 15, 20, 25%, etc., en caso de coeficientes menores de 15%, se tomó un (v) mínimo de 15%.

## 2. Corrección de esfuerzos por disminución de la resistencia de la madera sujeta a cargas estáticas y permanentes por un período largo de tiempo.

Observaciones efectuadas en otros países han señalado que la resistencia de la madera sujeta a cargas durante períodos largos de tiempo, sufre una disminución que llega hasta el 40% de su resistencia inicial por lo que se ha adoptado un factor de corrección con un valor de dos tercios.

$$T = \frac{2}{3} = 0.67$$

T = Factor de corrección por disminución de resistencia de la madera sujeta a cargas permanentes por largos períodos de tiempo.

## 3. Factor de corrección por grado de sazónamiento de la madera.

Los incrementos de resistencia son detectados al disminuir la humedad en la madera, bajo su punto de saturación de las fibras. El límite de saturación es del 30% de humedad aproximadamente. En la práctica al azar, una curva resistencia (ordenadas) y humedades (abscisas) se establece que el porcentaje de humedad a partir de la cual aumenta la resistencia al disminuir la humedad, es un poco menor que el límite de saturación.

Debido a los factores de compensación que existen entre la resistencia de madera verde y resistencia de madera seca, que hacen sus resistencias bastante similares, para maderas cuyo contenido de humedad sea mayor o igual al 30%, el factor de corrección por grado de sazónamiento es igual a 1.

H = 1.0 (para maderas con contenido de humedad igual o mayor que el 30%)

En nuestro caso, todas las especies tuvieron contenido de humedad superior al 30% por lo que no se hizo necesaria una corrección.

#### 4. Factor de seguridad

Se estima que siendo más conservador el factor de seguridad debe ser de 2. En esta forma, se intenta cubrir el efecto de otros factores que afectan las propiedades mecánicas y que no pueden evaluarse; así como también el riesgo de sobre cargas accidentales no previstas.

$$S = 1/2 = 0.50$$

S = factor de seguridad.

Resumen de corrección para obtener los esfuerzos básicos

$$\text{ESFUERZO BÁSICO} = \bar{X}.V.T.S.H$$

$\bar{X}$  = Promedio aritmético de los resultados de ensayo

V = Corrección por variabilidad

T = Corrección por disminución de resistencia en madera cargada por largo tiempo.

H = Corrección para adaptar los esfuerzos básicos corregidos a madera verde.

Aplicando los valores antes adoptados tenemos:

$$T = 2/3 = 0.67$$

$$S = 1/2 = 0.50$$

$$H = 1.0$$

Tenemos que:

$$\text{Esfuerzos básicos } \bar{X}.V.(0.67 * 0.50 * 1.0)$$

$$\text{ESFUERZOS BÁSICOS} = 0.335 \bar{X}.V$$

## H. Estadística

Una vez efectuados los ensayos a que se ha hecho referencia anteriormente, y tabulada convenientemente la información, se procedió a llevar a cabo la evaluación estadística de los mismos.

La primera etapa de la evaluación estadística consistió en la eliminación de los datos erróneos. Para este efecto, los datos debieron ceñirse a la siguiente condición (intervalo de confianza):

$$\bar{X} - tS_{\bar{x}} < X_i < \bar{X} + tS_{\bar{x}}$$

donde:

$\bar{X}$  = promedio de los datos del conjunto o muestra

$T$  = coeficiente de probabilidad estadística de Student, dependiente de la Frecuencia de datos y del grado de certeza. Para este caso, se tomó un valor de  $t = 2$ , que otorga un 95% de confiabilidad.

$X_i$  = cada uno de los valores del conjunto

$S_{\bar{x}}$  = error Standard de la media muestral, cuya formulación es:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

donde:

$n$  = tamaño de la muestra

$S_x$  = desviación típica muestral, definida como:

$$S_x = \sqrt{\frac{n \sum x_i^2 - (\sum X_i)^2}{n(n-1)}}$$

Los valores que escaparon del intervalo de confianza definido, fueron simplemente eliminados.

Como segunda etapa de evaluación, se procedió a calcular para cada una de las propiedades físico mecánicas estudiadas, los parámetros estadísticos, a saber:

a) Media muestral ( $\bar{x}$ )

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

b) Varianza muestral ( $S_x^2$ )

Se obtiene como producto de elevar al cuadrado la desviación típica muestral.

c) Desviación típica muestral ( $S_x$ ), también se le conoce con el nombre de Desviación estándar.

d) Coeficiente de variación (CV)

$$CV = \frac{S_x}{x} \times 100$$

Dado el enorme cúmulo de información, en el presente estudio, sólo se entregarán los resultados finales del cálculo estadístico efectuado, siendo éstos tabulados por especie.

## VIII. RESULTADOS

Cuadro No. 1 Tipo de bosque y suelo

Característica	Clasificación
Bosque	Bosque muy húmedo subtropical (cálido)
Suelo	Suelo de la altiplanicie central - sobre esquisto y arcilla esquistosa

Cuadro No. 2 Características generales de los árboles

Característica	Dulce Quemado ( <i>Phoebe mexicana</i> )	Cola de Pava ( <i>Cupania guatemalensis</i> )	Chirico ( <i>Licania arborea</i> )
Altura comercial promedio (mts.)	17	23	21
Diámetro promedio (cms.)	87	77	75
Edad aprox. (años)	75	75	60

Cuadro No. 3 Características generales de la madera

Característica	Dulce Quemado	Cola de Pava	Chirico
Olor	ausente	aromático	desagradable
Sabor	ausente	ausente	amargo
Color	7.5 YR 5/6 a 6/6 *	10 YR 6/4 a 7/4 *	2.5 Y 7/3 a 8/3 *
Lustre o brillo	Medianamente lustrosa	Medianamente lustrosa	Poco lustrosa
Grano	recto	recto	crespo
Textura	finá	finá	Gruesa
Dafios por manchas, hongos o ataques de insectos	Nula	Nula	nula

\*(Munsell 1992)

Cuadro No. 4 Propiedades físicas Dulce Quemado

Propiedad	Media	Desviación Standard	Coefficiente de Variación
Peso específico aparente verde ( $g/cm^3$ )	1.076	0.042	3.947
Peso específico aparente seco ( $g/cm^3$ )	0.670	0.042	6.376
Densidad ( $\gamma$ ) 12% C.H. ( $g/cm^3$ )	0.837	-----*	-----*
Contracción volumétrica (%)	10.764	3.666	0.341
Contracción tangencial (%)	5.017	1.201	0.239
Contracción radial (%)	3.758	1.469	0.391
Contracción axial (%)	0.623	2.391	3.839
Coefficiente CT/CR	1.335	-----*	-----*

Cuadro No. 5 Propiedades Físicas Cola de Pava

Propiedad	Media	Desviación Standard	Coefficiente de Variación
Peso específico aparente verde ( $g/cm^3$ )	0.978	0.102	10.446
Peso específico aparente seco ( $g/cm^3$ )	0.682	0.064	9.400
Densidad ( $\gamma$ ) 12% C.H. ( $g/cm^3$ )	0.824	-----*	-----*
Contracción volumétrica (%)	7.835	2.054	0.262
Contracción tangencial (%)	4.258	1.376	0.369
Contracción radial (%)	3.731	2.319	0.545
Contracción axial (%)	0.010	0.215	21.562
Coefficiente CT/CR	1.141	-----*	-----*

Cuadro No. 6 Propiedades Físicas Chirico

Propiedad	Media	Desviación Standard	Coefficiente de Variación
Peso específico aparente verde ( $g/cm^3$ )	0.577	0.055	9.491
Peso específico aparente seco ( $g/cm^3$ )	0.432	0.032	7.465
Densidad ( $\gamma$ ) 12% C.H. ( $g/cm^3$ )	0.531	-----*	-----*
Contracción volumétrica (%)	8.724	6.746	29.771
Contracción tangencial (%)	5.252	1.420	0.271
Contracción radial (%)	3.625	2.313	0.645
Contracción axial (%)	0.093	0.739	8.229
Coefficiente CT/CR	1.499	-----*	-----*

\* Nota: estos no tienen datos estadísticos, ya que fueron obtenidos por medio de modelos de regresión estadística.

Cuadro No. 7 Resumen de Propiedades Físicas

Propiedad	Dulce Quemado	Cola de Pava	Chirico
Peso específico aparente verde ( $g/cm^3$ )	1.076	0.978	0.577
Peso específico aparente seco ( $g/cm^3$ )	0.670	0.682	0.432
Densidad ( $\gamma$ ) 12% C.H. ( $g/cm^3$ )	0.837	0.824	0.531
Contracción volumétrica (%)	10.764	7.835	8.724
Contracción tangencial (%)	5.017	4.258	5.252
Contracción radial (%)	3.758	3.731	3.625
Contracción axial (%)	0.623	0.010	0.093
Coefficiente CT/CR	1.335	1.141	1.499

Cuadro No. 8 Propiedades Mecánicas Dulce Quemado

Propiedad	Media	Desviación Standard	Coefficiente de Variación	Esfuerzo Básico
Módulo de elasticidad (Kg./cm <sup>2</sup> )	3.491 * 10 <sup>6</sup>	430089.476	12.318	1.026 * 10 <sup>6</sup>
Módulo de ruptura (Kg./cm <sup>2</sup> )	1292.155	180.225	13.95	367.941
Compresión paralela (Kg./cm <sup>2</sup> )	355.429	5.794	1.630	101.208
Compresión perpendicular (Kg./cm <sup>2</sup> )	114.804	2.763	2.407	32.690
Corte paralelo (Kg./cm <sup>2</sup> )	348.000	12.550	3.606	112.376
Dureza (Kg.)	374.145	38.406	10.265	112.474

Cuadro No. 9 Propiedades Mecánicas Cola de Pava

Propiedades	Media	Desviación Standard	Coefficiente de Variación	Esfuerzo Básico
Módulo de elasticidad (Kg./cm <sup>2</sup> )	2.371 * 10 <sup>6</sup>	205462.882	8.685	7.255 * 10 <sup>5</sup>
Módulo de ruptura (Kg./cm <sup>2</sup> )	1071.479	240.183	22.416	287.156
Compresión paralela (Kg./cm <sup>2</sup> )	303.651	7.600	2.503	86.465
Compresión perpendicular (Kg./cm <sup>2</sup> )	116.553	4.030	3.456	33.188
Corte paralelo (Kg./cm <sup>2</sup> )	161.250	12.990	8.056	49.667
Dureza (Kg.)	245.455	38.969	15.876	69.173

Cuadro No. 10 Propiedades Mecánicas Chirico

Propiedad	Media	Desviación Standard	Coefficiente de Variación	Esfuerzo Básico
Módulo de elasticidad (Kg./cm <sup>2</sup> )	2.175 * 10 <sup>6</sup>	473889.444	17.287	7.596 * 10 <sup>5</sup>
Módulo de ruptura (Kg./cm <sup>2</sup> )	968.918	70.110	7.236	275.899
Compresión paralela (Kg./cm <sup>2</sup> )	265.954	7.540	2.835	75.730
Compresión perpendicular (Kg./cm <sup>2</sup> )	73.692	7.121	9.664	20.984
Corte paralelo (Kg./cm <sup>2</sup> )	360.625	16.630	4.369	121.938
Dureza (Kg.)	138.921	18.332	13.196	40.397

Cuadro No. 11 Resumen de Propiedades Mecánicas

Propiedad	Dulce Quemado	Cola de Pava	Chirico
Módulo de elasticidad (Kg./cm <sup>2</sup> )	3.491 * 10 <sup>6</sup>	2.371 * 10 <sup>6</sup>	2.175 * 10 <sup>6</sup>
Módulo de ruptura (Kg./cm <sup>2</sup> )	1292.155	1071.479	968.918
Compresión paralela (Kg./cm <sup>2</sup> )	355.429	303.651	265.954
Compresión perpendicular (Kg./cm <sup>2</sup> )	114.804	116.553	73.692
Corte paralelo (Kg./cm <sup>2</sup> )	348.000	161.250	360.625
Dureza (Kg.)	374.145	245.455	138.921

## IX. DISCUSIÓN

Al iniciar el recuento final de la presente investigación, es necesario reiterar y dejar en claro que, las conclusiones que ésta arroja tienen un carácter parcial, dado que no se contó con los datos de las pruebas mecánicas restantes, debido a que el laboratorio de ingeniería civil de la Universidad del Valle de Guatemala no contaba con el equipo necesario para realizar las pruebas. Sin embargo, no obstante la validez de lo anteriormente aseverado, lo que a continuación se describe, tiene importancia ya que describe los datos obtenidos, lo cual da una idea clara de las propiedades de las maderas trabajadas.

Teniendo presente lo anterior, el análisis estadístico de los antecedentes experimentales permite formular lo siguiente:

### A. Propiedades Mecánicas

1. Entrando a analizar los resultados obtenidos en la evaluación de las propiedades mecánicas para estado verde, se puede señalar, por los valores registrados para el ensayo de flexión estática, que destaca como la madera más resistente, la de dulce quemado, ya que sus resultados de módulo de elasticidad y módulo de ruptura fueron de  $3.491 \cdot 10^6$  (Kg./cm<sup>2</sup>) y 1292.155 (Kg./cm<sup>2</sup>) respectivamente. Ocupa el sitio más bajo a este respecto la de chirico con  $2.175 \cdot 10^6$  (Kg./cm<sup>2</sup>) y 968.918 (Kg./cm<sup>2</sup>), siendo la madera de cola de pava la que se sitúa en medio de las dos anteriormente mencionadas, con  $2.371 \cdot 10^6$  (Kg./cm<sup>2</sup>) y 1071.479 (Kg./cm<sup>2</sup>).

2. La resistencia a la compresión paralela al sentido de las fibras, muestran valores que oscilan entre 265.954Kg./cm<sup>2</sup> y 355.429Kg./cm<sup>2</sup>, correspondiendo estos a cChirico y dulce quemado respectivamente. El dato que presentó cola de pava fue de 318.926Kg./cm<sup>2</sup>.

3. Los resultados anteriores ponen en evidencia que la madera de dulce quemado es la que presenta más resistencia al someterla a cargas tanto de flexión como de compresión, seguida por la madera de cola de pava y por último la de chirico. Esto se hace evidente al comparar los resultados con los datos de densidad.
  
4. El ensayo que somete a las maderas a cargas de compresión perpendicular a las fibras, entrega cifras de  $73.692\text{Kg./cm}^2$ ,  $114.804\text{Kg./cm}^2$  y  $116.553\text{Kg./cm}^2$ , correspondientes a chirico, dulce quemado y cola de pava respectivamente. En este caso, se hace evidente que la madera de cola de pava es más resistente en esta posición, lo cual puede deberse a que el fenómeno de fluencia o fenómeno del flujo plástico (deformación de una pieza de madera producida por cargas permanentes de gran duración) fue mucho más evidente en esta especie. Esto dificultó la determinación de la ruptura.
  
5. En cuanto a resistencia al corte paralelo, los valores obtenidos fueron de  $380.625\text{Kg./cm}^2$  para chirico,  $348\text{Kg./cm}^2$  para dulce quemado  $161.250\text{Kg./cm}^2$  para cola de pava, y. La razón de esto puede ser debido a la disposición de las fibras en la madera, ya que este ensayo mide la resistencia de un material fibroso cuando la carga aplicada tiende a rasgarlo. La disposición de las fibras en la madera de chirico le dan más resistencia al mismo, ya que se observó que el corte no se dio tan rápidamente como con dulce quemado o cola de pava, sino que más paulatinamente.
  
6. Con los resultados obtenidos por medio de la prueba de dureza, se puede observar que la madera de dulce quemado es la que presentó más resistencia, por lo que sería la más recomendada de las tres para usarla de pavimento. El dato que presentó la madera de cola de pava también muestra que es recomendable para dicho uso. La madera de chirico no mostró un dato como las maderas anteriores, por lo que no se recomienda para dicho uso.

Tomando en un contexto general, los resultados experimentales obtenidos en la realización de los cinco ensayos de propiedades mecánicas para estado verde que abarca este estudio, las especies que presentaron un mejor comportamiento en cuanto a resistencia a la aplicación de cargas son dulce quemado y cola de pava.

Siguiendo el mismo razonamiento del punto anterior, se concluye que la especie que arrojó los resultados más deficientes en cuanto a resistencia mecánica fue chirico.

Las aseveraciones anteriores se vieron confirmadas por la opinión de carpinteros que tuvieron contacto con las maderas trabajadas, ya que al ver y trabajar la madera de Dulce Quemado y Cola de Pava, creyeron estar trabajando con maderas de alta calidad como por ejemplo cedro. Caso contrario se dio con la madera de Chirico, de la cual dijeron que es una madera muy difícil de trabajar, con un aspecto poco agradable.

Se recomienda que en el momento de usar estas maderas en estructuras, se tomen en cuenta los datos de esfuerzos básicos presentados, ya que estos representan la resistencia permisible de la madera en piezas libres de defectos y sanas.

## B. Propiedades Físicas

1. El estudio de las propiedades físicas del material involucrado en esta investigación permite concluir que, en cuanto a densidad se refiere, los valores obtenidos son satisfactorios para las tres especies, ya que presentan correlación con los datos arrojados por los ensayos de flexión estática, compresión paralela a la fibra y corte paralelo a la fibra. La densidad presentada por las especies al 12% de contenido de humedad, son:  $0.531\text{g/cm}^3$  para chirico,  $0.824\text{g/cm}^3$  para cola de pava y  $0.837\text{g/cm}^3$  para dulce quemado.

2. Al analizar el peso específico aparente seco y compararlo con las tablas realizadas por Markwardt y Heck (1988), se observa que la madera de dulce quemado se clasifica como madera muy pesada, al igual que la madera de cola de pava y la madera de chirico se definiría como moderadamente liviana.

3. En lo que respecta a la propiedad física que analiza la reducción dimensional que presenta la madera como consecuencia de la disminución en su contenido de humedad, fenómeno conocido como contracción de la madera, se puede ver que (según Markwardt y Heck 1988), la madera de cola de pava y chirico tienen la clasificación de contracción muy baja, y la de dulce quemado se clasifica con contracción baja.

Partiendo de que, la madera es un material anisotrópico, se estudió el comportamiento de la contracción en los tres sentidos de los ejes de coordenadas, vale decir, en el sentido tangencial, radial y axial.

4. Centrando el análisis conclutivo, en los valores de contracción tangencial, estos van desde 4.258% para cola de pava, 5.017% para dulce quemado y 5.252% para chirico. En los valores de contracción radial, se tiene 3.625% para chirico, 3.731% para Cola de Pava y 3.758 para dulce quemado. Los valores para contracción axial no sobrepasan el 1%, por lo que su efecto es despreciado, no siendo considerada en el presente estudio.

5. Al analizar el coeficiente dado por la contracción tangencial entre la contracción radial (CT/CR), se observa que la madera de dulce quemado y cola de pava se clasifican como maderas muy estables, las cuales no se agrietan y presentan buen secado, mientras que la madera de chirico tiene una clasificación de madera estable, con muy pocas grietas y muy leve atención al secado (ver tablas realizadas por Markwardt y Heck 1988)

6. En cuanto a los valores obtenidos para contracción total al estado seco (anhidro), la madera que presentó mayor estabilidad dimensional fue la de cola de pava con un 7.835 % de contracción volumétrica, seguida por chirico con 8.724 % y por último está la madera de dulce quemado con una contracción de 10.764 %, lo que reafirma la conclusión del punto b, en el que se asevera que las tres especies tienen una estabilidad aceptable (menor del 12%).

En resumen, al hacer un compendio general de los resultados obtenidos con el análisis de las propiedades físico-mecánicas de las 3 especies arbóreas, unidas a las características generales de la madera (Cuadro No. 4), se puede configurar un panorama claro respecto de cuales especies podrían incorporarse exitosamente a los futuros planes nacionales de comercialización de madera, ya que en el mercado se necesita madera de buenas características físico-mecánicas.

Sobre el particular, las evidencias experimentales logradas, indican que las especies con mayores posibilidades a este respecto son dulce quemado y cola de pava.

Finalmente, es importante aseverar que las consideraciones anteriormente expresadas deberán conformar en sí, el punto de partida para la imperiosa necesidad de realizar en base a estas tres especies, futuras investigaciones sobre otras propiedades, ya sean químicas, físicas o mecánicas, necesarias para encontrar respuestas que permitan confirmar, complementar y ampliar los resultados obtenidos con esta investigación.

## X. CONCLUSIONES

A. En las pruebas de resistencia mecánica correspondiente a flexión estática, así como a compresión y dureza, la madera más resistente fue la de Dulce quemado, seguida por Cola de Pava, teniendo por último a Chirico.

B. En cuanto a resistencia al corte paralelo, el valor más alto corresponde a Dulce quemado, seguido por Chirico y por último a Cola de Pava.

C. Los valores obtenidos de densidad son correlativos con los valores obtenidos en las pruebas de flexión estática, compresión, corte y dureza, ya que los valores más altos de densidad correspondieron a los valores más altos de estas pruebas de resistencia mecánica, empezando por Dulce quemado con el valor más alto, seguido de Cola de Pava y teniendo por último a la madera de Chirico.

D. Al analizar la contracción volumétrica presentada por la madera de las tres especies, se puede concluir que éstas son bastante estables, ya que ninguna sobrepasó los límites aceptables.

E. La contracción tangencial más alta fue la de Chirico, seguida por Dulce quemado y teniendo por último a Cola de Pava.

F. La contracción radial más alta la presentó la madera de Dulce quemado, seguida por Cola de Pava y la más baja fue la de Chirico.

G. Los valores presentados por las tres maderas para contracción axial fueron despreciados, ya que sus valores no sobrepasaron un porcentaje significativo (menos del 1%)

### H. Recomendaciones de Uso

I. La especie forestal *Phoebe mexicana* (dulce quemado) es la que presentó características más aceptables dado que tiene una estabilidad dimensional muy

aceptable y obtuvo los resultados más altos en lo que a resistencia se refiere y de acuerdo a la percepción que se tuvo de su madera, se puede recomendar su uso para estructuras o pavimento (parque, listón piso). Su buena apariencia la hace recomendable para el trabajo de carpintería.

2. Por los resultados de la especie forestal *Cupania guatemalensis* (cola de pava), se recomienda su uso para carpintería (amueblados, puertas, marcos de ventana, etc.), debido a sus propiedades, tanto físico mecánicas, como visuales.

3. Por lo observado en la madera de *Licania arborea* (chirico), se recomienda su uso para trabajo de carpintería, debido al aspecto que esta madera presenta y por el peso específico que esta presentó. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que esta madera presenta cierta dificultad para darle un acabado final.

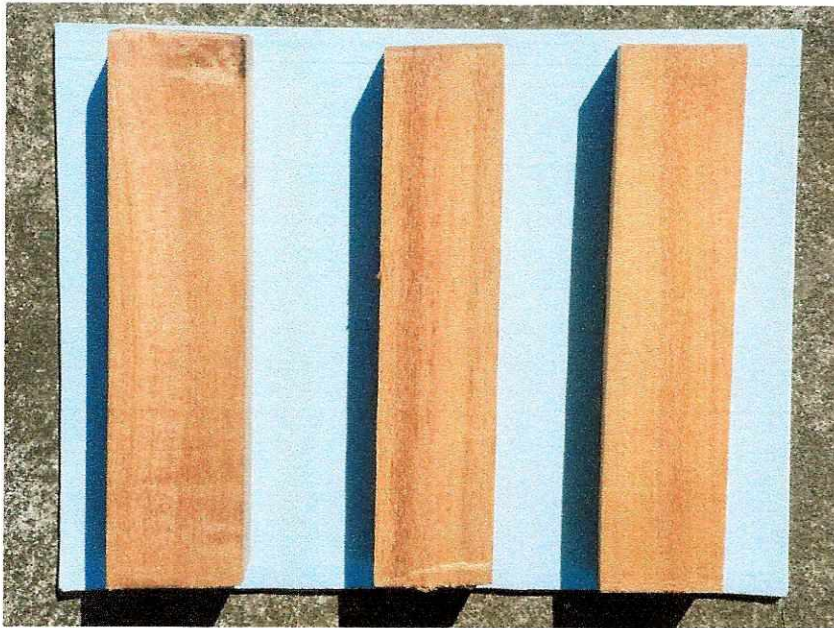
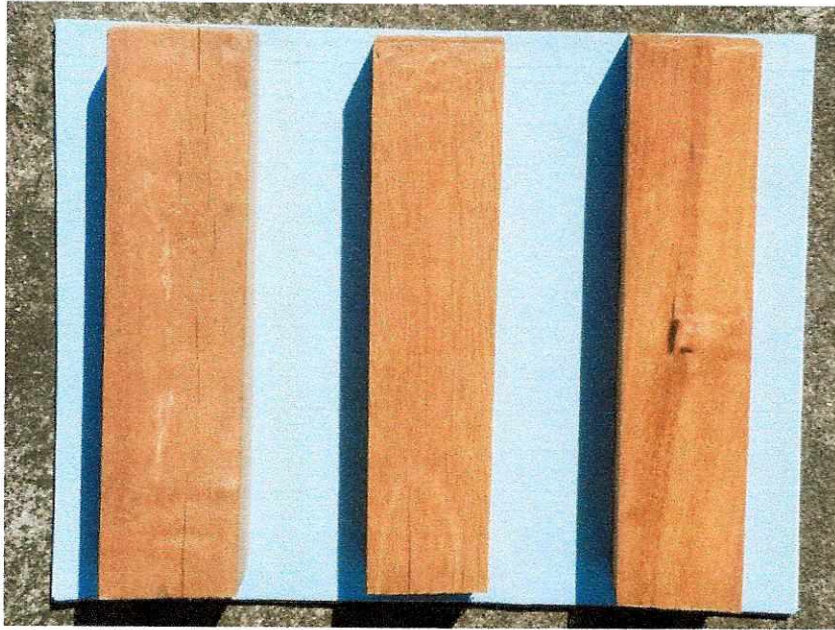
## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Contreras, I. 1967. *Descripción anatómica, propiedades físicas y algunos usos de 25 maderas de Costa Rica*. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, IICA. 192 p.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 1974. *Annual book of ASTM standards: designación D-143*. Easton, Md., American National Standards Institute. p. 37-71.
- INIF (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, ME). 1981. *Anatomía macroscópica y algunas características físicas de 17 maderas tropicales mexicanas*. 2ª ed. México, DF. (Boletín Divulgativo no. 46). 61 p.
- Barajas Morales, J.; Echenique Manrique, R.; Carmona Valdovinos, T. F. 1981. *La madera y su uso en la construcción no. 3: estructura e identificación*. México, DF. Editorial Tipos Futura. 70 p.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CR) 2000. *Manejo de Semillas de 100 Especies Forestales de América Latina*. Programa de Investigación. Proyecto de Semillas Forestales –PROSEFOR-. Unidad de Producción de Medios. Turrialba, CR. 204 p.
- CTEF (Centro Técnico de Evaluación Forestal). 1972. *Estudio de las Propiedades Físico Mecánicas y Estructura Anatómica de 7 Especies de Pino de Guatemala*. Guatemala. 114 p.
- Guía de Laboratorio, Propiedades Mecánicas de la Madera. 2003. Depto. Ing. Civil, Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala.
- Karsulovic, J. 1994. *Propiedades Mecánicas de la Madera*. Chile. Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad de Chile. 48 p.
- León, A. 1994. *Propiedades Físicas de la Madera*. Chile. Departamento de Tecnología de la Madera. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile. 15 p.
- Munsell. 1992. *Soil Color Charts*. Macbeth. Division of Kollmongen Instruments Corp. Munsell Colors. US.
- Rincón la Torre, CE. 1980. *Evaluación de las propiedades físico-mecánicas y usos probables de la madera de 9 especies del bosque nacional Alexander Von Humboldt (Pucallpa)*. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE, Universidad Nacional Agraria La Molina, Programa Académico de Ciencias Forestales. 96 p.
- Saravia, JM. 1985. *Propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas; industrialización de la madera*. Guatemala, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 10 p.

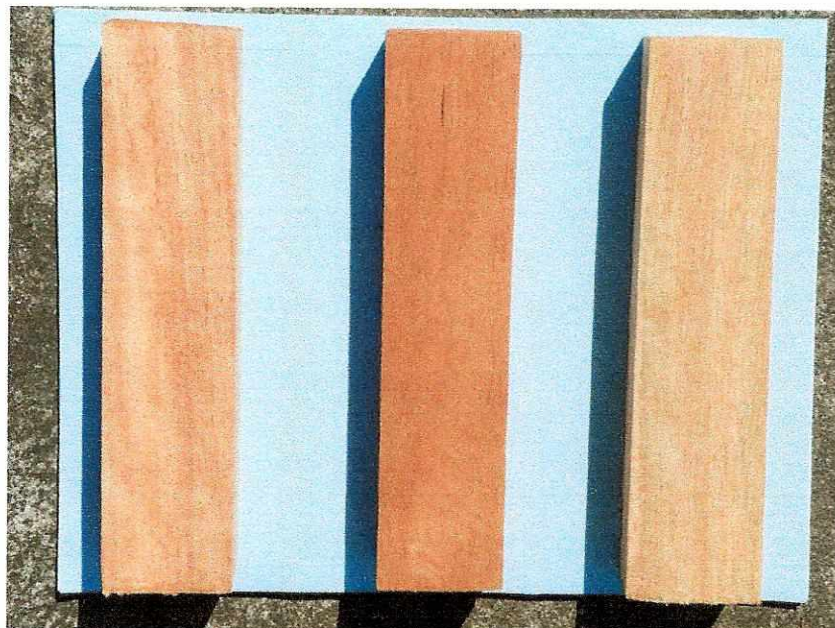
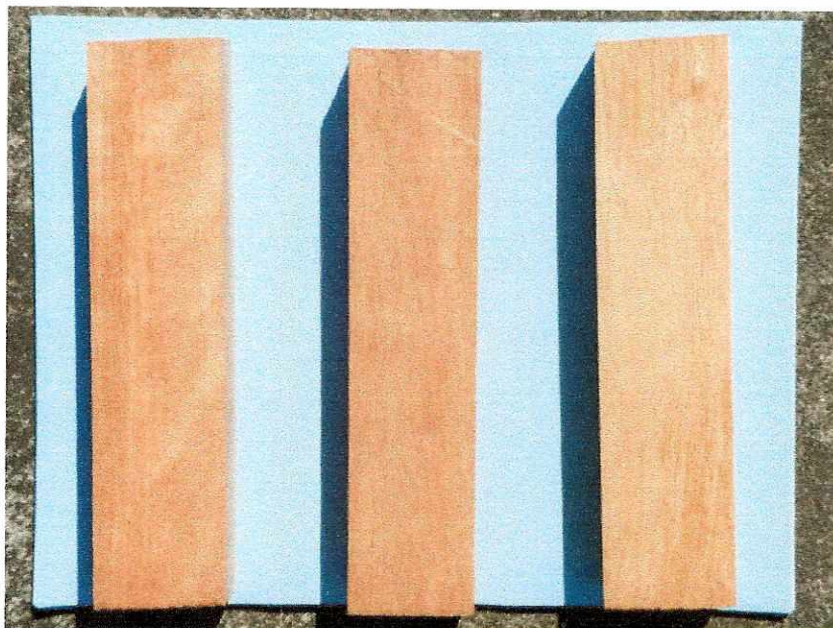
- Simmons, C., Tarano, JM; Pinto JH. 1959. *Clasificación de Reconocimiento de los Suelos de la República de Guatemala*. Guatemala. Editorial del Ministerio de Educación Pública José Pineda Ibarra. Instituto Agropecuario Nacional. 1000 p.
- Valdes, HC. 1988. *Anatomía y Propiedades Físicas de la Madera Lonchocarpus latifolius (Willd) HBK, Terminalia amazonia (J. F. Gmel) y Pouteria Gallifruca Cronquist*. Guatemala. Tesis USAC, Facultad de Agronomía. 59 p.
- Vilela, J. 1969. *Propiedades Físicas y Mecánicas de 137 Maderas de la Guyana Venezolana*. Venezuela. Ministerio de Agricultura y Cría, Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida, VE. 17 p.

## XII. APÉNDICE

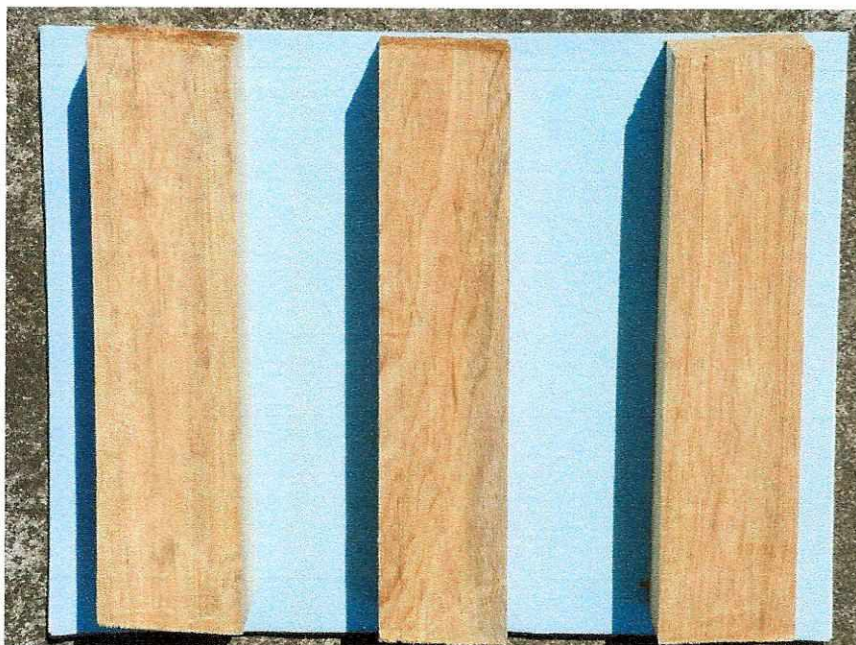
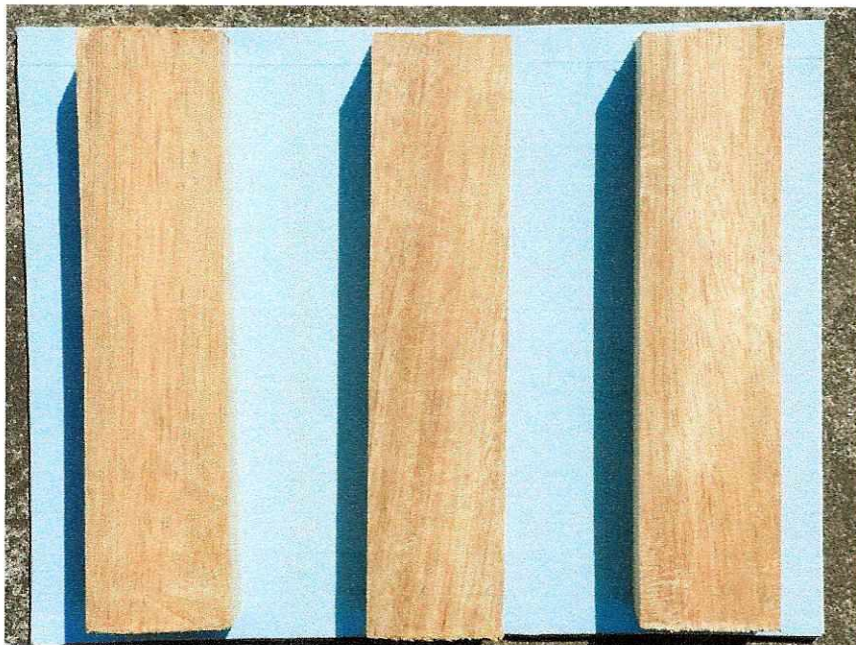
### Anexo A. Fotografías de Madera de Dulce Quemado

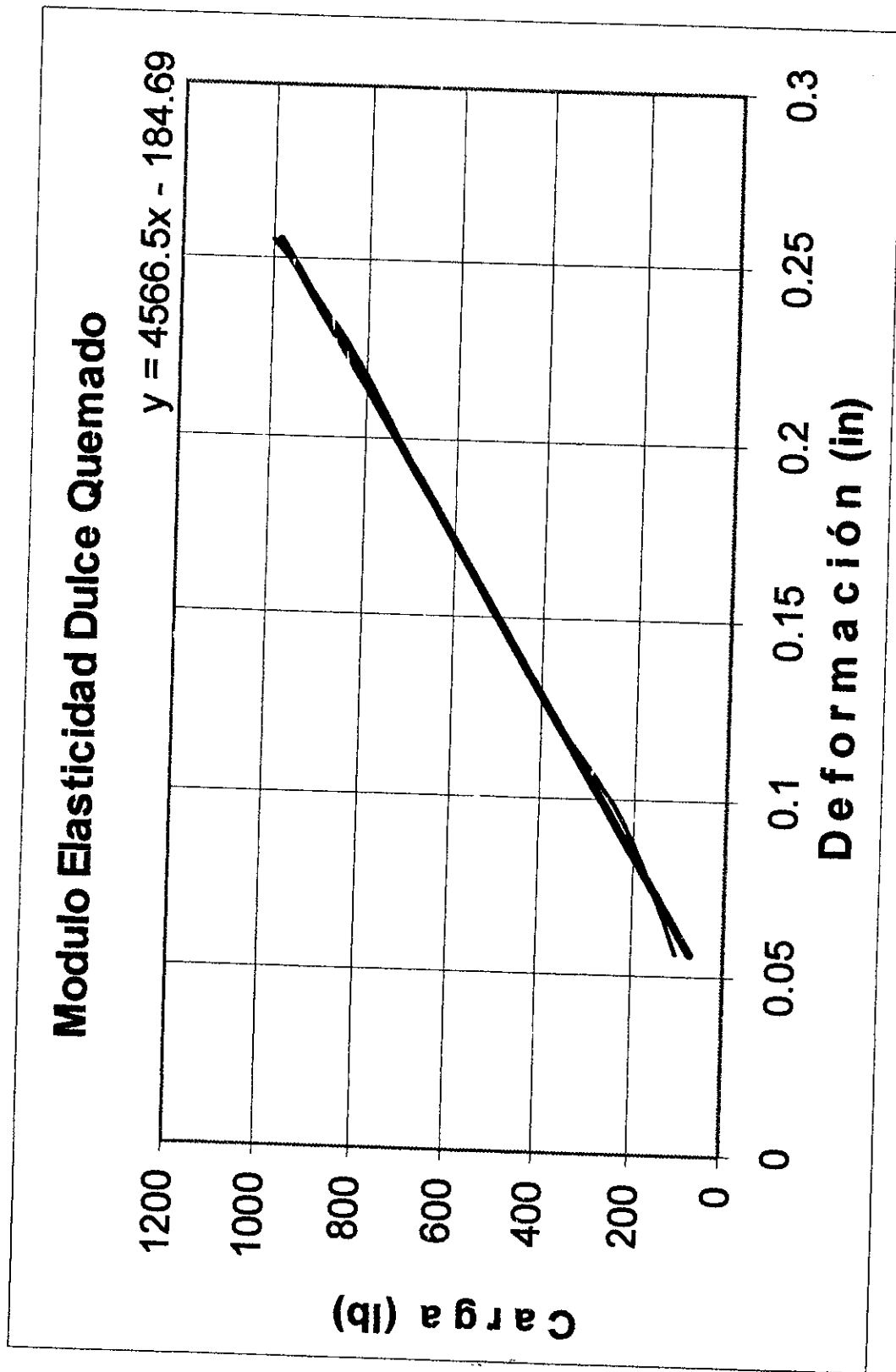


Anexo B. Fotografías de Madera de Cola de Pava

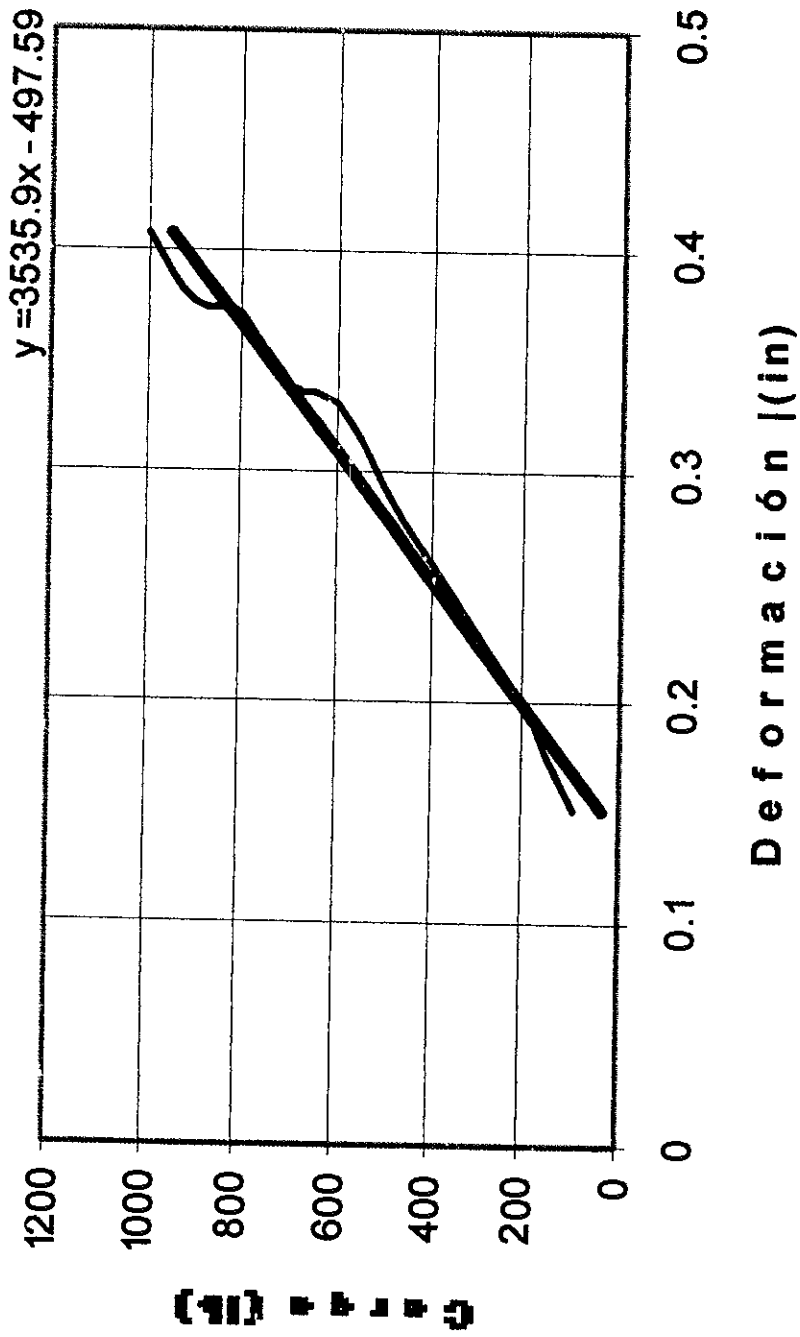


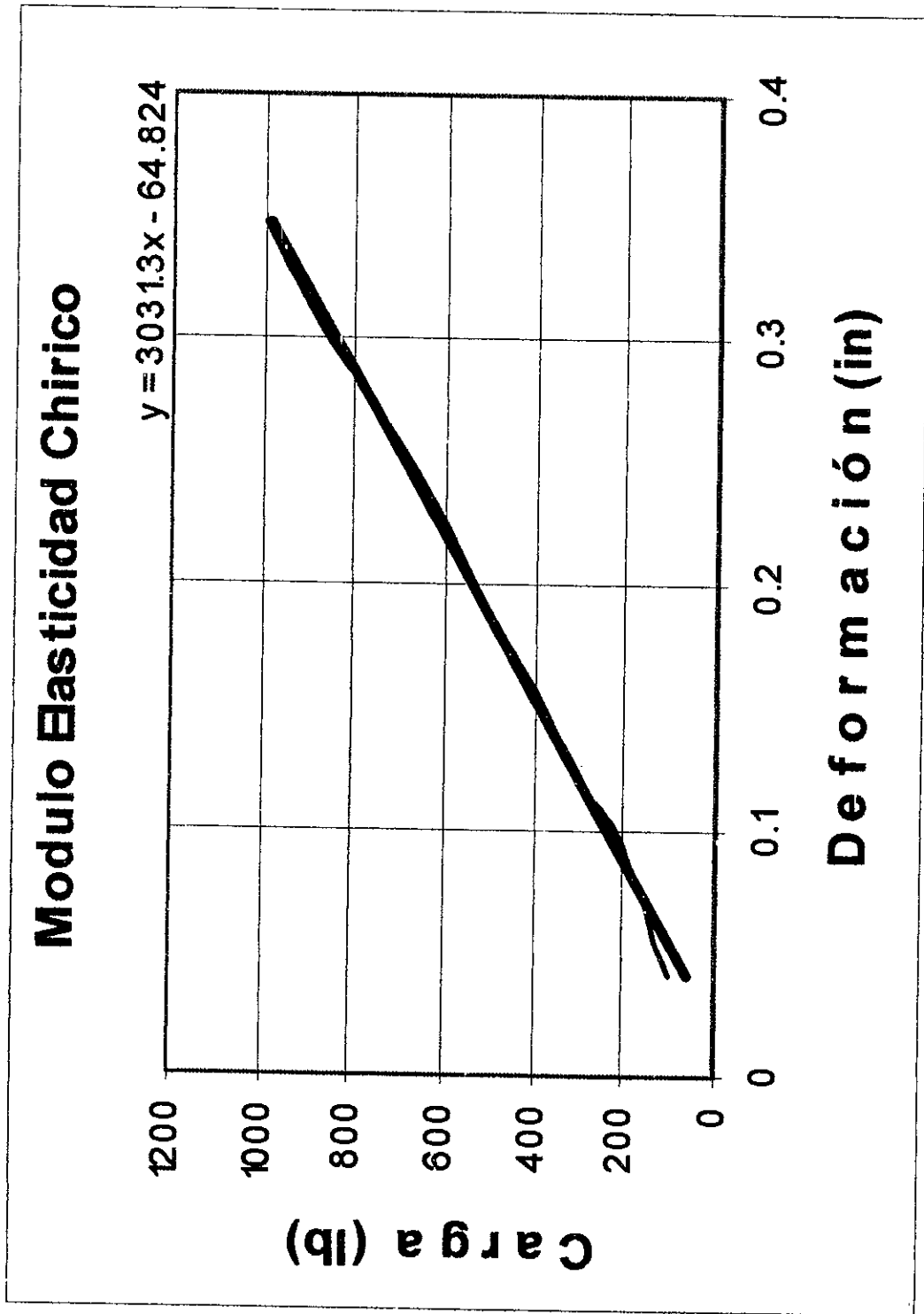
Anexo C. Fotografías de Madera de Chirico



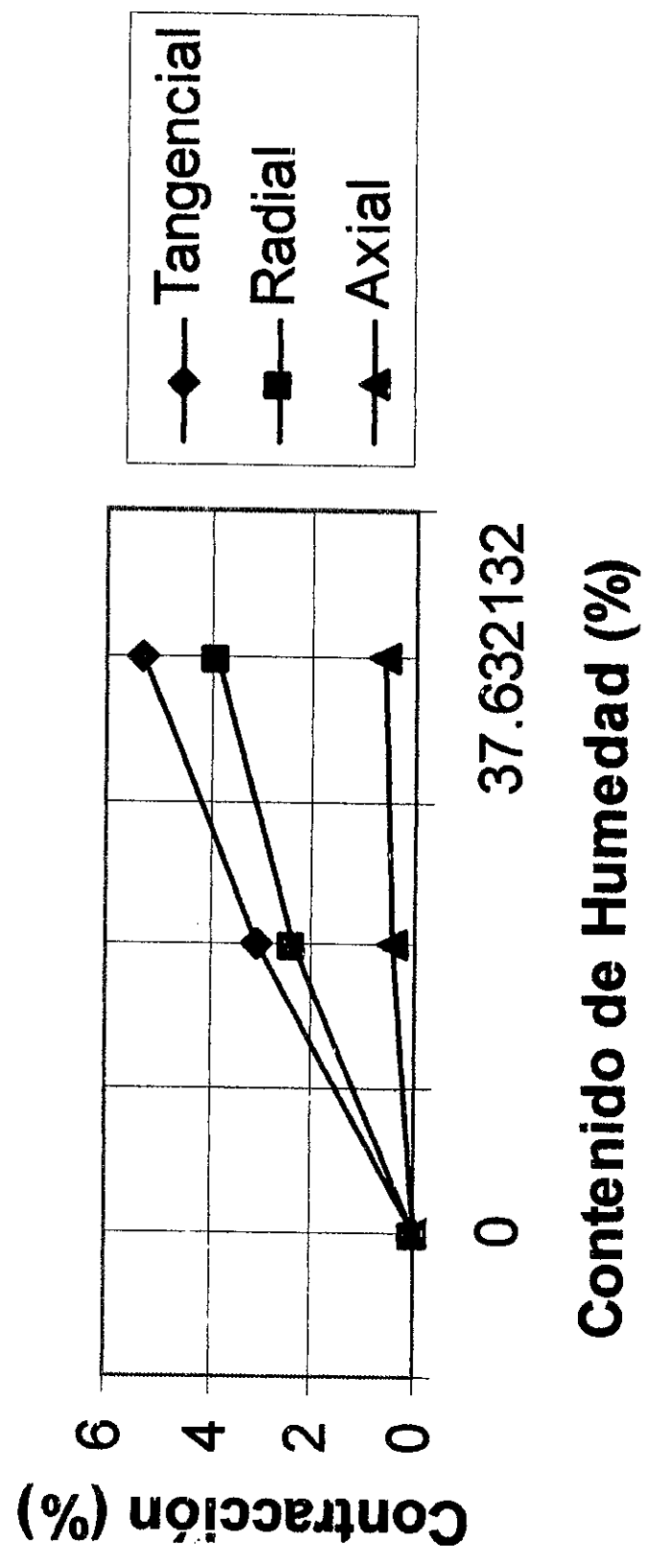


## Modulo Elasticidad Cola de Pava



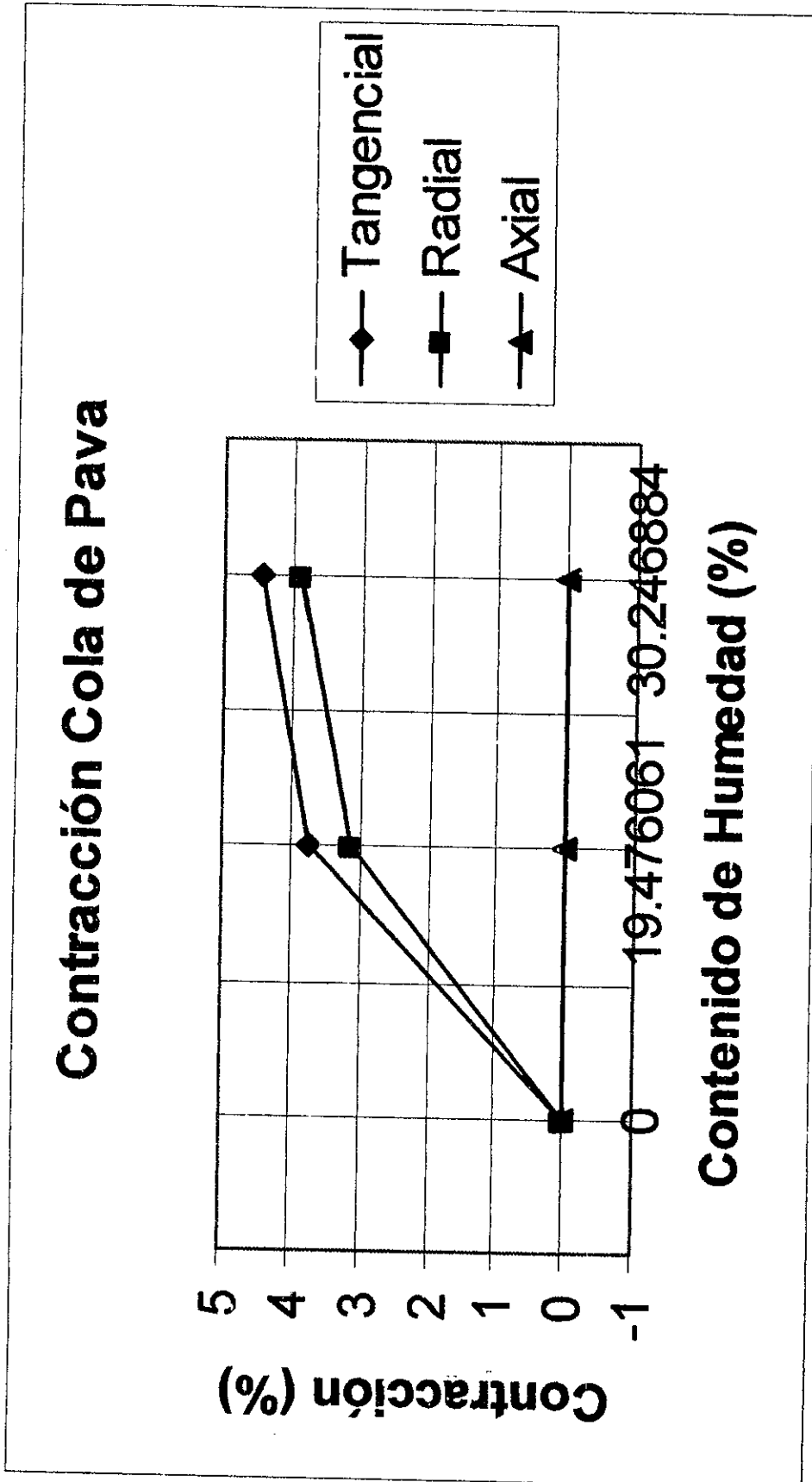


# Contracción Dulce Quemado



# Contenido de Humedad (%)

- ◆— Tangencial
- Radial
- ▲— Axial



# Contracción Chirico

