

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

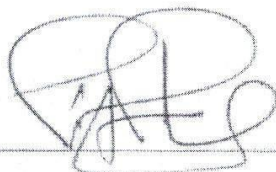
Propiedades mecánicas de la madera de Palo
Blanco (*Tabebuia donnell-smithii*), Pucté
(*Bucida buceras*), y Manchiche (*Lonchocarpus
castilloi*)

Trabajo de investigación presentado por Pablo
Alejandro Castillo Mazariegos para optar al
grado académico de Licenciado en Ingeniería
Forestal

Guatemala

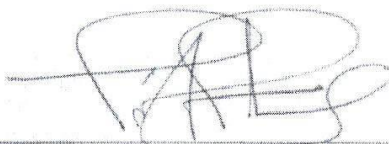
2003

Vo.Bo.: (f)



Ing. Jorge Escobar Méndez

Tribunal: (f)



Ing. César Castañeda Salguero

(f)



Ing. Jorge Escobar Méndez

(f)



Ing. Oscar Manuel Núñez

Fecha de aprobación: Guatemala, 30 de septiembre de 2003

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE	iv
LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE GRÁFICOS	vii
RESUMEN	viii
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
III. ANTECEDENTES	4
IV. MATERIALES Y METODOLOGÍA	15
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
VII. BIBLIOGRAFÍA	42
VIII. APÉNDICES	47

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Valores de compresión paralela a la fibra tabulados en orden decreciente	27
2. Descripción del tipo de falla presentada en cada cuerpo de prueba	27
3. Valores de compresión perpendicular a la fibra tabulados en orden decreciente	28
4. Descripción del tipo de falla presentada en cada cuerpo de prueba	28
5. Valores de resistencia al esfuerzo de cizalla, piezas con corte radial tabulados en orden decreciente	31
6. Valores de resistencia al esfuerzo de cizalla, piezas con corte tangencial tabulados en orden decreciente	31
7. Descripción del tipo de falla presentada en cada cuerpo de prueba	31
8. Valores de módulo de flexión tabulados en orden decreciente	35
9. Valores de módulo de ruptura tabulados en orden decreciente	35
10. Descripción del tipo de falla presentada en cada cuerpo de prueba	35

11. Valores de dureza Janka axial tabulados en orden decreciente	37
12. Valores de dureza Janka lateral tabulados en orden decreciente	38
13. Descripción del tipo de falla presentada en cada cuerpo de prueba	38

LISTA DE GRÁFICOS

Foto	Página
1. Árbol de palo blanco	9
2. Árbol de pucté	10
3. Árbol de manchiche	11
4. Diseño para la prueba de flexión	16
5. Diseño para la prueba de ruptura	17
6. Diseño para la prueba de compresión paralela a la fibra	18
7. Diseño para la prueba de compresión perpendicular a la fibra	19
8. Diseño para la prueba de cizalla	20
9. Diseño para la prueba de dureza Janka	21
10. Diferencia entre fallas tangencial y radial, respectivamente	30

RESUMEN

En este trabajo se realiza la determinación, por medio de ensayos, de las siguientes propiedades mecánicas de la madera: Módulos de elasticidad y ruptura, compresiones paralela y perpendicular al grano, resistencia al esfuerzo de cizalla, y dureza Janka.

Los ensayos fueron realizados en las tres especies forestales guatemaltecas existentes en forma natural en la zona de vida bosque subtropical húmedo:

- A. Palo blanco (*Tabebuia donell-smithii*)
- B. Pucté (*Bucida buceras*)
- C. Manchiche (*Lonchocarpus castilloi*)

Los resultados indican que la madera de palo blanco es la más “débil” de todas, esto no quiere decir que el hecho de no soportar tan bien las pruebas no trabaje a su favor en ciertas condiciones. El pucté es el más resistente a la compresión perpendicular a las fibras, a los esfuerzos de cizalla (radial y tangencial), y al de flexión. Por último, el manchiche superó a las otras dos especies en las pruebas de compresión paralela a las fibras, ruptura, dureza Janka (axial y lateral).

En base a estos resultados, se concluye que la madera de palo blanco debe ser usada en aplicaciones en donde se requiera una elasticidad y peso bajo, como mueblería fina. No así para trabajo pesado, porque no resiste mucho a las compresiones y no es lo suficientemente duro. Por otro lado, ni el pucté ni el manchiche deben emplearse para construcción en donde sea requerida elasticidad, pues ambas maderas llegan al punto en donde se quiebran demasiado pronto. Sin embargo pueden ser usadas para pisos debido a

su dureza, y hasta cierto punto como columnas y como tarimas por su resistencia a la compresión.

Se recomienda revisar el diseño experimental de la prueba de flexión para corregir los errores encontrados, así como realizar las pruebas en igualdad de condiciones para descartar cualquier influencia provocada por algún cambio al armar los equipos.

INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país forestal, tanto por el tipo de tierras (10), como por su privilegiada localización geográfica y diversidad climática. Vale la pena mencionar la existencia de 14 zonas de vida que favorecen la diversidad forestal. Estas y otras ventajas comparativas, como lo es el hecho de tener puertos en ambos océanos y al estar a la mitad de camino ya sea hacia los principales mercados de los hemisferios norte y sur. El estar en la región subtropical permite que los turnos de corta sean significativamente más cortos que en los países nórdicos o australes.

Es indiscutible que desde siempre, las tierras boscosas en este país han sido consideradas como reservas para la ampliación de la frontera agrícola y no como posibilidades de desarrollo a través de la producción y transformación forestal y las economías de escala que se podrían derivar de dichas actividades [...] (2).

Hasta la fecha, los empresarios nacionales no han sido convencidos por el Gobierno, las universidades y la administración pública forestal de que el negocio forestal compite favorablemente con la agricultura y otras actividades de tipo productivo.

De hecho, los procesos de deforestación han estado ineludiblemente ligados a la política agraria y la política agropecuaria de nuestro país, de los mayas en el período clásico a nuestros días. Y hasta el momento no ha existido voluntad para contrarrestar los efectos de las políticas mencionadas en los procesos de sustitución del bosque por sistemas de producción agropecuarios (2).

Por esto, es lógico que en nuestro país la industria forestal tenga un atraso de un par de décadas en cuanto a desarrollo, maquinaria, participación, políticas y visión se refiere. En Guatemala predomina el uso de sierras circulares sobre las sierras de cinta. Al usar las sierras circulares incorrectamente puede haber un desperdicio de hasta una pulgada por pie aserrado, por la acción de la propia sierra (6). La clave es saber qué tipo

de sierra usar en qué caso. Por ejemplo usar la sierra circular para cortar tablas y diámetros menores, y usar la sierra de cinta para cortar trozas.

Recién en los últimos años se ha reconocido el potencial forestal del país y se ha comenzado a dirigir los recursos hacia la explotación sostenible de la madera.

Como país forestal se debe contar con la mayor cantidad de información posible acerca de las especies forestales (maderables o no) que habitan en nuestros suelos. Esta información tiene que cubrir todos los aspectos, tales como biología, ecología, fisiología, usos, propiedades de la madera, turnos de corta, condiciones necesarias para un crecimiento óptimo, mercado, comercio, precios, calidad, etc.

Con esta información pueden encontrarse nuevos mercados o ampliar los ya existentes para así no depender de una o dos especies, sino que aprovechar la mayor cantidad posible. Sin embargo, lo importante es generar dicha información en el país; con madera y personal locales.

En este trabajo se desarrolla información básica de algunas de las propiedades mecánicas de la madera de palo blanco, pucté y manchiche. Las propiedades a tratar son la resistencia a la compresión y al efecto de cizalla, la dureza, y la fuerza necesaria para hacer que se rompan. Dicha información puede ser utilizada para encontrar nuevos mercados, en campos tan distintos como la construcción y la decoración, pasando por la elaboración de muebles. También se trata la naturaleza de la madera como material y algunas características taxonómicas de las especies en cuestión.

CAPITULO II

I. Objetivos

A. General

- Aplicar ensayos físico mecánicos a la madera de Palo Blanco (*Tabebuia donell-smithii*), Pucté (*Bucida buceras*), y Manchiche (*Lonchocarpus castilloi*) para conocer sus posibilidades de uso en diferentes procesos.

B. Específicos

- Calcular y encontrar experimentalmente los módulos de elasticidad y de ruptura de dichas maderas en la prueba de flexión estática.
- Medir la fuerza necesaria para que la madera falle en las pruebas de compresión (paralela y perpendicular a las fibras).
- Determinar la resistencia de la madera de cada una de las 3 especies al esfuerzo de cizalla.
- Determinar la dureza Janka de cada una de las 3 especies.
- Sugerir posibles usos de acuerdo a sus características físico mecánicas.

CAPITULO III

Antecedentes

A. La madera como material

Secciones transversal, radial, y tangencial. Al examinar un bloque de madera con la ayuda de una lente de bajo poder de magnificación se revelan dos sistemas distintos de células. El sistema axial contiene filas de células con sus ejes largos orientados verticalmente en el tallo, mientras que el sistema radial consiste en filas de células orientadas horizontalmente con respecto al eje del tallo. Cada uno de los dos sistemas tiene una apariencia característica en los tres tipos de secciones empleadas en el estudio de la madera: transversal, radial, o tangencial. La transversal corta el eje principal del árbol en un ángulo recto para revelar la dimensión más pequeña de células en el sistema axial. El patrón radiante de haces vasculares que atraviesan los anillos de crecimiento se expone. Cuando un árbol es cortado longitudinalmente, se obtienen secciones radiales o tangenciales. Ambas muestran la extensión vertical de las células del sistema axial, pero dan diferentes vistas de los haces. La sección radial pasa de un lado a otro de la médula y muestra los haces como bandas horizontales a través del sistema axial. Los anillos parecen bandas paralelas. Una sección tangencial corta en una posición tangente a los anillos de crecimiento y corta los haces perpendicularmente respecto a su extensión horizontal para revelar el alto y el ancho. El arreglo de los anillos de crecimiento tiene forma paraboloide. Esto ocurre porque la madera fue cortada en ángulo debido a la leve forma cónica del tronco del árbol. Los diferentes aspectos estructurales de la madera descritos en las respectivas secciones son la razón de los variados granos o patrones vistos en la madera aserrada.

Variaciones estructurales y defectos. La composición y el arreglo celular de la madera varían según la especie. Esto influye en la apariencia y las propiedades y causa una amplia gama de maderas de donde escoger para varios usos. También es la base para la identificación de la madera. Las maderas de las gimnospermas, como el pino, son

conocidas como maderas suaves, y las de las angiospermas, latifoliadas como el roble, son maderas duras. No obstante, la distinción no es cierta; algunas maderas duras (balsa) son más suaves que algunas de las maderas suaves (*Taxus* sp.).

En términos de la anatomía de la madera, los árboles son colocados en dos categorías generales – porosos o no-porosos. Salvo algunas raras excepciones, estas categorías anatómicas corresponden a la clasificación taxonómica de los árboles. Las gimnospermas son no-porosas y las angiospermas son porosas. La madera de las gimnospermas es relativamente simple en su estructura. La característica más llamativa es la ausencia de vasos y de ahí el nombre no-porosas. La madera consiste principalmente de traqueidas y fibras en el sistema axial. El parénquima axial y los canales resiníferos están presentes en ciertas especies, pero el parénquima radial está presente siempre y constituye los haces, algunas veces junto con las traqueidas radiales. La madera de los árboles angiospermos consiste de vasos, traqueidas, fibras, y parénquima en varias proporciones. Los cuatro tipos de células están presentes en el sistema axial. El tamaño y la distribución de los vasos permiten que se pueda clasificar con mayor detalle como maderas con porosidad anular y maderas con porosidad difusa. Los árboles con porosidad anular, tales como roble y fresno, tienen vasos definidos de mayor diámetro en la madera del xilema, mientras que los árboles con porosidad difusa, tales como el abedul y el maple, tienen vasos de más o menos el mismo tamaño distribuidos uniformemente en toda la extensión del anillo de crecimiento. El sistema radial está constituido por las células del parénquima y ocasionalmente traqueidas.

La variación en la madera es causada por la presencia de defectos tales como nudos, grano espiralado, maderas de tensión y de compresión, separación de fibras, y bolsas resiníferas. Los nudos son causados por la inclusión de ramas muertas o vivas a medida que el árbol crece en circunferencia. El grano espiralado es el arreglo en espiral de los elementos de las células en relación al eje del árbol. Las maderas de compresión y de tensión son anomalías estructurales en gimnosperma y angiospermas, respectivamente, que se forman cuando los árboles se desvían de la posición normal vertical a causa del viento o de otras cargas. Las separaciones de fibras y las bolsas

resiníferas son casi lo mismo, excepto por el hecho que las bolsas resiníferas están llenas de resina. Los defectos, de acuerdo al tipo y la magnitud, pueden afectar de manera perjudicial la apariencia, fuerza, estabilidad dimensional, y otras propiedades de la madera

Densidad y gravedad específica. La densidad es el peso o masa de una unidad de volumen de madera, y la gravedad específica es la razón de la densidad de la madera a la del agua. En el sistema métrico, la densidad y la gravedad específica son numéricamente idénticas. La densidad de la madera varía de más o menos 0.1 a 1.2 gramos por centímetro cúbico (gravedad específica 0.1 a 1.2). Las diferencias entre especies y entre muestras de la misma especie son atribuibles a diferentes proporciones de madera, volumen vacío (volumen de las cavidades de las células y espacios en las paredes), y el contenido de extractivos. La cantidad de extractivos en la madera varía desde menos de 3 por ciento hasta más de 30 por ciento del peso seco al horno. Es obvio que la presencia de estos materiales, localizados en su mayor parte dentro de la pared celular, puede tener un gran efecto en la densidad.

La determinación de la densidad de la madera con relación a aquella de otros materiales es difícil porque la madera es higroscópica, y el peso y el volumen son muy influenciados por el contenido de humedad. Para lograr obtener números comparables, el peso y el volumen son determinados con contenidos de humedad especificados. Los estándares son peso seco al horno (prácticamente cero contenido de humedad) y volumen seco al horno o volumen verde (contenido de humedad arriba del punto de saturación de las fibras, el punto teórico en el cual las paredes celulares están completamente saturadas y las cavidades celulares vacías, el cual promedia alrededor del 30 por ciento).

La mayoría de las propiedades mecánicas de la madera están muy correlacionadas con la densidad y con la gravedad específica. Es posible saber más acerca de la naturaleza de una muestra de madera determinando su gravedad específica que por cualquier otra medición simple.

Higroscopicidad. La madera es higroscópica (exhibe afinidad por el agua) y puede absorber agua líquida, si está en contacto con ella, o en la forma de vapor de la atmósfera que la rodea. Aunque la madera puede absorber otros líquidos y gases, el agua es el más importante. Debido a su higroscopicidad, la madera, ya sea como parte del árbol vivo o como material, siempre contiene humedad. Esta humedad afecta todas las propiedades de la madera, pero debe notarse que sólo la humedad contenida en las paredes celulares es importante; la humedad en las cavidades solamente añade peso.

La cantidad de humedad en las paredes celulares varía del más o menos 20 hasta el 35 por ciento (basándose en el peso seco al horno de la madera), o sea en el punto de saturación de las fibras. Más allá de este punto, la humedad entra a las cavidades, y cuando éstas están completamente llenas, se alcanza el máximo contenido de humedad de la madera. El contenido de humedad de algunas maderas puede ser muy alto. Maderas muy livianas, como la balsa, pueden tener hasta más o menos 800 por ciento, el pino 250 por ciento, *Fagus* sp. 120 por ciento, y así.

Cuando la madera verde está expuesta a la atmósfera, su contenido de humedad baja gradualmente. La humedad en las cavidades celulares es la que se pierde primero. Con el tiempo el contenido de humedad cae hasta llegar a un promedio de 12-15 por ciento). Las condiciones locales de temperatura del aire y humedad relativa dictan el nivel de humedad final.

La higroscopicidad es de la mayor importancia porque la humedad en la madera afecta todas las propiedades de la madera. Tiene una relación directa con el peso de trozas y troncos verdes, con influencia subsiguiente en los costos de transporte. Las dimensiones cambian. La resistencia al pudrimiento y a los insectos es bastante afectada. También es influenciado el procesamiento, tales como el secado, el tratado con preservantes, y el pulpado. El pegado y los acabados y las propiedades mecánicas, térmicas, y acústicas también son afectados por el contenido de humedad.

Propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas o de fuerza de la madera miden su habilidad para resistir fuerzas aplicadas que puedan tender a cambiar su forma y tamaño. La resistencia a dichas fuerzas depende de la magnitud y la manera de aplicación de la fuerza. También depende de varias características de la madera, tales como contenido de humedad y densidad. El término fuerza es usando comúnmente en un sentido general para referirse a todas las propiedades mecánicas. Esto puede llevar a confundir a las personas, ya que hay muchos tipos diferentes de propiedades elásticas y de fuerza. Una madera que sea relativamente fuerte en un aspecto puede no serlo si se le compara con otra especie en otra propiedad. Es importante mencionar que la madera tiene propiedades drásticamente diferentes respecto a la posición del grano, paralelo o perpendicular al mismo. Es decir, es un material anisotrópico.

Las propiedades mecánicas de la madera incluyen fuerza en tensiones y compresiones (axiales y transversales), cizalla, clivaje, dureza, flexión estática y shock (flexión dinámica, tenacidad). Las pruebas respectivas determinan el estrés por unidad de área bajo carga (en el límite elástico y carga máxima) y otros criterios de fuerza, tales como el módulo de elasticidad (un criterio de qué tan tieso es el material), módulo de ruptura (fuerza para doblarlo) y otras. Las pruebas son hechas, por lo general, con especímenes pequeños y limpios, usualmente de dos por dos pulgadas o dos por dos centímetros en un corte transversal. Los datos obtenidos del laboratorio son analizados para producir estreses al trabajar, los cuales están disponibles para su uso por parte de ingenieros y arquitectos al diseñar estructuras de madera. A veces, las pruebas son hechas con componentes estructurales de tamaño real. Otras veces, se someten a estudios células individuales si el tipo de material lo requiere (por ejemplo, el papel). La densidad es el mejor indicador de la fuerza de la madera limpia; a mayor densidad, mayor fuerza. La fuerza de la madera también se ve influenciada por su contenido de humedad cuando fluctúa por debajo del punto de saturación. Generalmente, un descenso en el contenido de humedad se ve acompañado por un aumento en la mayoría de propiedades relativas a la fuerza. La temperatura y la duración de la carga también afectan la fuerza. En general, la fuerza decrece a medida que suba la temperatura. La madera que esta sujeta a cargas permanentes soportará cargas menores que las indicadas

por una prueba instantánea en el laboratorio. Los factores más importantes que reducen la fuerza son los defectos en la madera, tales como nudos, anatomía anormal causada por la acción de las tensiones y compresiones, y las desviaciones del grano. Su efecto adverso depende del tipo y la extensión del defecto, la posición, y la manera de someter la madera a cargas.

A. Las especies

El **palo blanco** o *Tabebuia donell-smithii* (sinónimos: *Cybistax donell-smithii* y *Roseodendron donell-smithii*) pertenece a la familia Bignoniaceae. Es un árbol de alrededor de 30 metros de altura por 90 centímetros de diámetro, de fuste cilíndrico, recto y ligeramente acanalado; copa redondeada, hojas grandes y flores amarillas en panículas. Crece en Escuintla, Jutiapa, Quetzaltenango, Retalhuleu, San Marcos, Santa Rosa y Suchitepéquez (5). Las muestras con las cuales se trabajó provienen del área de Chicacao.

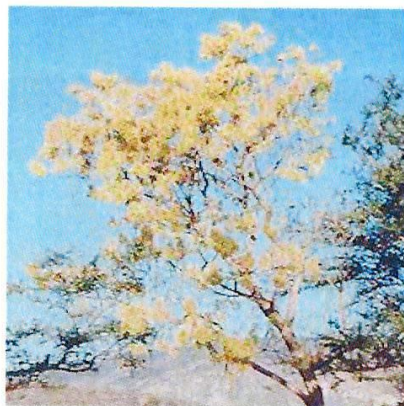


Foto 1. Árbol de palo blanco

La madera de palo blanco es de color muy claro, lo cual facilita su coloración con tintes; está clasificada como una madera moderadamente liviana a moderadamente pesada. Sus usos van desde carpintería fina hasta construcciones generales, pasando por decoración de interiores y paneles (5).

El palo blanco, también denominado primavera, es un árbol maderero importante en su área de distribución natural. Sus maderos alcanzan buen precio, y se reporta que el grado de rendimiento extremadamente bueno para una especie frondosa de madera dura. [...] La madera es de color crema, amarillo o marrón claro, a menudo con listas o bandas y sin una transición definida entre la albura y duramen. La fibra es de recta a variegada y la textura mediana a tosca. El peso específico es de alrededor de 0.44 por gr/cm^3 , y el

contenido de humedad de la madera verde es alrededor del 62 por ciento. Se seca al aire con rapidez con poca degradación. La madera con un contenido de humedad del 12 por ciento tiene una resistencia al doblado de 6,571 newtons por cm^2 , un módulo de elasticidad de 717 newtons por cm^2 y una resistencia máxima a compresión de 3,861 newtons por cm^2 . [...] Se asierra y se trabaja a máquina con mucha facilidad y toma un buen acabado. Los usos principales son muebles, chapa decorativa, molduras, maderos estructurales y leña (8).

El **pucté** o *Bucida buceras* pertenece a la familia Combretaceae. Es un árbol de entre 35 y 40 metros de altura por 150 centímetros de diámetro, de fuste cilíndrico, recto, sin contrafuertes y con ramificación simpodial; copa deprimida y generalmente ancha, formando varias capas, hojas simples de forma elíptica, de color verde oscuro brillante (el envés es de color amarillento) y flores colocadas sobre espigas axilares. Crece en Alta Verapaz, Izabal y Petén (5). Las muestras con las cuales se trabajó provienen del área Norte del Petén, específicamente de las coordenadas UTM 1964190 y 799686.

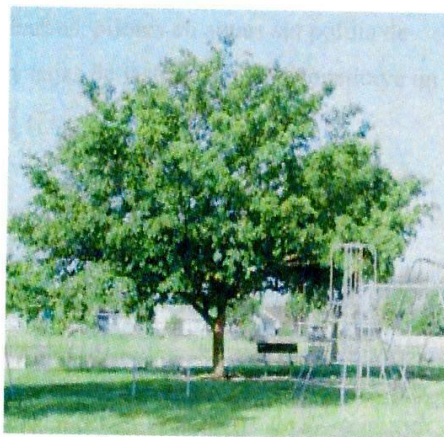


Foto 2. Árbol de pucté

La madera de pucté es de color café claro; presenta jaspeado, tiene grano irregular y textura fina. Sus usos van desde durmientes hasta pisos, pasando por mueblería semi-lujosa carpintería fina y postes (5).

La densidad y la dureza de la madera del pucté determinan en gran parte la manera en que sería usada. Aparentemente las densidades varían un tanto, dependiendo de dónde crecen los árboles. Las densidades encontradas en la literatura para la madera secada al horno fueron: 0.85 g por cm^3 en Guatemala y 0.75 g por cm^3 en México; las densidades para este material secado al aire fueron: de 1.01 a 1.07 g por cm^3 en

Guatemala y 1.10 g por cm³ en Puerto Rico. Se seca satisfactoriamente considerando su alta densidad y se encoge poco durante el proceso [...]. Tiene una dureza lateral de 1,063 Kg./cm², un módulo de ruptura de 1,085 Kg./cm² y un módulo de elasticidad de 1.4×10^5 Kg./cm². Se reporta que tiene un alto contenido de sílice. Debido a esto, la madera de este árbol es difícil de trabajar tanto a mano como con herramientas eléctricas. Sin embargo, tiene un atractivo color que va de marrón amarillento oscuro a marrón verdusco con una fibra variegada y se puede acabar hasta obtener una superficie reflejante como el vidrio. Se manufacturan pisos de alta calidad y algunos muebles. Otros usos sugeridos de alto valor son puertas y molduras interiores. Otros usos incluyen vigas para puentes y madera para construcciones navales, cubiertas de barcos, pilotes en aguas sin polilla de mar (*Teredo spp.*), postes, traviesas de ferrocarril y cajas de lastre. El pucté constituye un buen combustible y rinde un carbón excelente [...] (7).

La madera de pucté es resistente a la descomposición y a insectos, tiende a torcerse, seca fácilmente, su aserrado y su cepillado son difíciles pero aceptables, el torneado excelente, el lijado fácil y bueno, el clavado y el atornillado son regulares, la resistencia al rajado es mediana, y el acabado es bueno (13).

El **manchiche** o *Lonchocarpus castilloi* pertenece a la familia Fabaceae. Es un árbol de entre 30 y 40 metros de altura, con diámetros que van desde 40 hasta 100 centímetros, de fuste recto y corteza con olor característico; las hojas son imparipinadas y flores color púrpura brillante colocadas en racimos. Crece en Alta Verapaz, Izabal, Petén y Quiché (5). Las muestras con las cuales se trabajó provienen del área Norte del Petén, específicamente de las coordenadas UTM 1964190 y 799686.

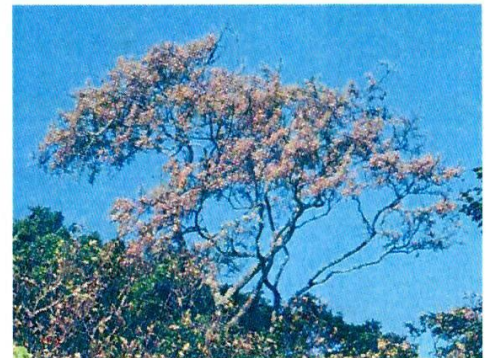


Foto 3. Árbol de manchiche

La madera de manchiche es de color café rojizo; presenta rayado, tiene grano entrelazado y textura media. Sus usos van desde carretas hasta durmientes, pasando por duelas y construcción (5).

La madera de manchiche es resistente al ataque de hongos e insectos, se seca fácilmente y sin curvas, su aserrado es moderado y bueno, su cepillado es difícil pero bueno, el torneado se da con facilidad y es excelente, el lijado fácil y bueno, el clavado y el atornillado son buenos, la resistencia al rajado es alta, y el acabado es bueno (13).

B. Las normas

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:

- Normas AFNOR (Francia)
- Normas ASTM (EE.UU.)
- Normas DIN (Alemania)
- Normas BS (Inglaterra)
- Normas INN (Chile)
- Normas COPANT (Latinoamérica) (10)
- Normas IRAM (Argentina) (4)

Para ayudar a generar o a recopilar y corroborar información sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de estas especies, he decidido aplicarles algunas pruebas físico mecánicas. Para que el proceso sea estándar, se siguen las normas ASTM (1). Una razón para usar estas normas es que las pruebas que realicé previamente en otros cursos han sido llevadas a cabo bajo estos mismos parámetros. La otra es que dichos parámetros son reconocidos internacionalmente y tienen equivalentes en las otras normas existentes.

Estas normas indican las características necesarias y los pasos a seguir al realizar dichas pruebas. Indica dimensiones de la madera, tipo de corte, forma de colocar los cuerpos de prueba, etc. Vale la pena mencionar que se pueden hacer subdivisiones en cada prueba, de manera que la mitad de los ensayos se hagan colocando los cuerpos de prueba “correctamente” y la otra mitad colocándolos con un giro de 90 grados, y observar su comportamiento.

Las pruebas son las siguientes:

1. Flexión estática
2. Ruptura
3. Esfuerzo de cizalla
4. Compresiones paralela y perpendicular a las fibras
5. Dureza Janka

C. Estudios previos

1. B.F. Kukachka – 1968

En su documento *Propiedades seleccionadas de 52 especies de madera del Departamento del Peten, Guatemala*, Kukachka presenta varios cuadros las siguientes propiedades: gravedad específica, dureza axial y lateral, y módulos de elasticidad y ruptura. Dos de las especies tratadas acá repiten su participación en mi tesis, tal es el caso del pucté y del manchiche, lo cual me da un punto de referencia para trabajar.

2. Eduardo Coronel – 1994

En su documento *Variación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de especies nativas y cultivadas en el Chaco argentino*, Coronel se dedica a describir el proceso de selección, recolección, preparación, y cuidado de las muestras. Coronel lleva a cabo los ensayos para determinar: compresión paralela a las fibras; flexiones estática y dinámica; dureza Janka; y cizalladura. También nos presenta las normas IRAM, usadas en Argentina.

3. José Karsulovic - 1994

En su documento *Propiedades mecánicas de la madera*, Karsulovic trata acerca de las normas, de las propiedades de la madera como material y de la teoría detrás de los ensayos para determinar dichas propiedades. Los ensayos que el autor discute son: compresiones axial y transversal; tracciones axial, normal, y oblicua a las fibras; resistencias al cizalle, a las flexiones estática y dinámica; y durezas Janka y Brinell. Aún y cuando no trata ninguna especie en específico y por lo tanto no presenta ningún resultado, incluye algunas fórmulas para un enfoque puramente matemático del tema. La teoría es fácil de entender y resuelve muchas dudas mediante esquemas y dibujos.

4. Green; J. Winandy y D. Kretschmann - 1999

Chapter 4: Mechanical Properties of Wood>>. En *Wood handbook. Wood as an engineering material*. Este es sin duda alguna el documento más completo, aunque no describa ninguna metodología. Aquí, los autores describen con lujo de detalle los efectos de los nudos, de la influencia del tiempo de duración de la carga en las propiedades de la madera, la temperatura, la pudrición y un sin número de factores más. También cuenta con muchos cuadros en donde se resumen 11 propiedades mecánicas de más de 50 especies de árboles, tanto en el sistema métrico como en el inglés. Las gráficas en donde se logra ver el comportamiento de la madera en una variedad de pruebas tampoco faltan. A pesar de todo esto, el listado de especies solamente incluye una de las tres especies con las cuales estoy trabajando, el palo blanco.

5. J. Escobar - 2002

En el curso *Tecnología de la madera*, introdujo al estudiante (el autor) a las propiedades mecánicas de la madera y a los ensayos para determinarlas. Se trataron: la flexión estática; las compresiones paralela y perpendicular a las fibras; el cizallamiento; el clivaje; y la dureza. Durante el desarrollo del curso, se realizaron las cuatro primeras pruebas, despertando la inquietud para hacer de dichos ensayos mi trabajo de tesis.

CAPITULO IV

Materiales y metodología

A. De campo

Según las normas ASTM, se debe contar con no menos de cinco árboles por especie a ser tratada. También hay especificaciones de cómo y dónde deben ser cortados, tratados, trasladados, protegidos, identificados, etc. Por último, cada ensayo requiere de cuerpos de prueba provenientes de partes específicas del árbol.

Sin embargo, debido a restricciones del alcance de este trabajo, de tiempo, y sobre todo monetarias, se optó por reducir la escala del volumen de material de trabajo. Así, se trabajó con piezas de las especies en cuestión. Dichas piezas se compraron ya dimensionadas a diferentes proveedores para que la selección tanto de árboles como de partes del mismo fuera al azar.

Vale la pena mencionar que se ha hecho el mayor esfuerzo por respetar el espíritu mismo de estos ensayos, teniendo especial cuidado tanto al realizar las pruebas como al asegurarse que la madera estuviera limpia y libre de defectos para quedar así dentro de los márgenes permisibles de error. Toda la madera con la que se trabaja tiene un 12 por ciento de humedad.

Hay varias razones para haber escogido estas especies, entre ellas están el hecho que son nativas, que hay abundancia de tales árboles en el campo, la propuesta de encontrar nuevos mercados, y que no hay mucha información al respecto. Información hecha en Guatemala, claro está.

B. De laboratorio (Basada en los criterios establecidos en la norma ASTM D 143 – 83) (1)

1. Flexión estática

- **Materiales y equipo**

- Vigas de madera de cada una de las 3 especies de 2 x 2 x 30 pulgadas (1).
- Máquina universal
- Un soporte con 30 pulgadas de luz entre sus apoyos
- Una viga con dos cargas con 10 pulgadas de luz entre las mismas para ejercer presión
- Deformímetro (1)
- Un tornillo y una placa de metal para fijar el deformímetro

- **Procedimiento**

Consistió en colocar el cuerpo de prueba de forma horizontal y aplicar fuerza continuamente hasta alcanzar las 1000 libras (600 libras en el caso del palo blanco porque es una madera menos resistente que las otras dos). Las mediciones se

hicieron de forma directa al leer la cantidad de fuerza aplicada mostrada por las agujas del reloj de la máquina y la deformación causada indicada en el deformímetro (1). Se tomaron los datos de la deformación causada cada 100 libras.

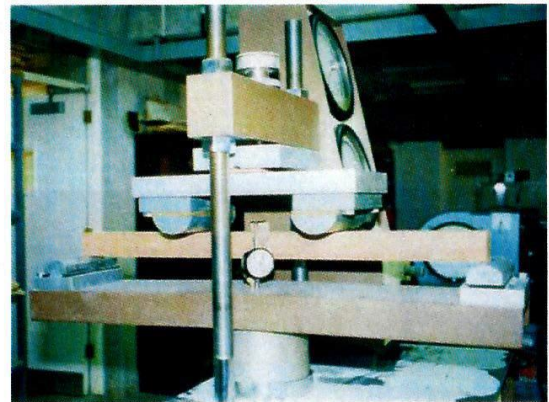


Foto 4. Diseño para la prueba de flexión

Se graficó carga (en libras) contra deformación (en pulgadas) (*l*) para cada cuerpo de prueba de cada una de las 3 especies.

Los cuerpos de prueba se colocaron en dos ocasiones de modo que la carga fuera aplicada a la cara tangencial que estuvo más cerca del centro del árbol (*l*). En las otras dos, los cuerpos de prueba se colocaron con una variación de 90 grados y se observó el comportamiento de los mismos.

2. Ruptura

- **Materiales y equipo**

- Vigas de madera de cada una de las 3 especies de 2 x 2 x 30 pulgadas (*l*).
- Máquina universal
- Un soporte con 30 pulgadas de luz entre sus apoyos
- Una viga con dos cargas con 10 pulgadas de luz entre las mismas para ejercer presión

- **Procedimiento**

Consistió en colocar el cuerpo de prueba de forma horizontal y aplicar fuerza continuamente hasta que fallara. La medición se hizo de forma directa al leer la cantidad de fuerza aplicada mostrada por las agujas del reloj de la máquina. Sólo se tomó el



Foto 5. Diseño para la prueba de ruptura

dato de la cantidad de fuerza necesaria para hacer que el cuerpo de prueba fallara (1). Para las dimensionales finales, libras sobre pulgada cuadrada, se usó la siguiente fórmula:

$$(\text{Libras por fuerza}) / (\text{ancho por alto}^2)$$

Debe clasificarse el tipo de falla de flexión estática observada en el cuerpo de prueba de acuerdo a la apariencia de la superficie fracturada y de la manera en la cual se desarrolla la ruptura (1).

El cuerpo de prueba debe colocarse de modo que la carga sea aplicada a la cara tangencial que esté más cerca del centro del árbol (1). Sin embargo, la colocación de los cuerpos de prueba se varió de 90 en 90 grados y se observó el comportamiento de los mismos.

3. Compresión paralela a las fibras

- **Materiales y equipo**

- Vigas de madera de cada una de las 3 especies de 2 x 2 x 8 pulgadas (1).
- Máquina universal

- **Procedimiento**

Consistió en colocar el cuerpo de prueba de forma vertical y aplicar fuerza continuamente hasta que fallara. La medición se hizo de forma directa al leer la cantidad de fuerza aplicada mostrada por las agujas del reloj de la máquina.

Sólo se tomó el dato de la cantidad

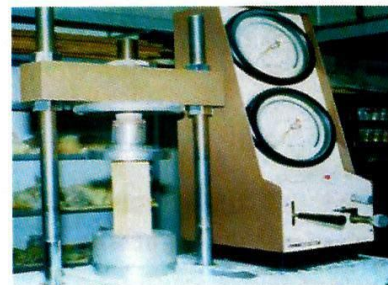


Foto 6. Diseño para la prueba de compresión paralela a la fibra

de fuerza necesaria para hacer que el cuerpo de prueba fallara (1). Para las dimensionales finales, libras sobre pulgada cuadrada, se dividió la cantidad de libras por el múltiplo del ancho por el alto (área de contacto).

Debe clasificarse el tipo de falla de compresión observada en el cuerpo de prueba de acuerdo a la apariencia de la superficie fracturada. En el caso que hubiera ocurrido más de un tipo de falla debe describirse cada uno en el orden en el cual ocurrieron (1).

4. Compresión perpendicular a las fibras

- **Materiales y equipo**

- Vigas de madera de cada una de las 3 especies de 2 x 2 x 6 pulgadas (1).
- Máquina universal

- **Procedimiento**

Consistió en colocar el cuerpo de prueba de forma horizontal y aplicar fuerza continuamente hasta que fallara. La medición se hizo de forma directa al leer la cantidad de fuerza aplicada mostrada por las agujas del reloj de la máquina. Sólo se tomó el dato de la cantidad de fuerza necesaria para hacer que el cuerpo de prueba fallara (1). Para las dimensionales finales, libras sobre pulgada cuadrada, se dividió la cantidad de libras por el múltiplo



Foto 7. Diseño para la prueba de compresión perpendicular a la fibra

del ancho por el largo (área de contacto).

El cuerpo de prueba debe colocarse de modo que la carga sea aplicada a una cara radial (*I*). Sin embargo, la colocación de los cuerpos de prueba se varió de 90 en 90 grados y se observó el comportamiento de los mismos.

5. Esfuerzo de cizalla

- **Materiales y equipo**

- Cuerpos de prueba de madera de cada una de las 3 especies con forma de "P" de 2 x 2 x 2.5 pulgadas (la mitad de los cuales deben tener corte radial y la otra mitad con corte tangencial) (*I*).
- Máquina universal manual
- Deformímetro de anillo

- **Procedimiento**

Consistió en aplicar fuerza continuamente en la saliente del cuerpo de prueba de tal modo que la superficie sobre la cual descansa dicho cuerpo proveyera un empuje en sentido contrario. Con esto se logró un efecto parecido al de cortar algo con unas tijeras (*I*).

La medición se hizo en el deformímetro de anillo que forma parte del sistema. La fuerza necesaria para que el cuerpo de prueba fallara se calculó con la ayuda de fórmulas que relacionan la deformación del anillo con la cantidad de fuerza aplicada. El factor es 790.79 por la lectura del deformímetro.

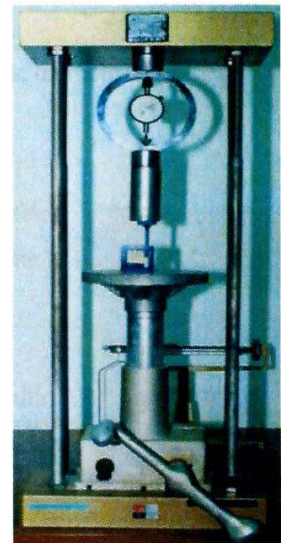


Foto 8. Diseño para la prueba de cizalla

Debe medirse superficie del área en donde se aplicó presión para poder hacer la relación. Sólo se tomó el dato de la cantidad de fuerza necesaria para hacer que el cuerpo de prueba fallara (1). Para las dimensionales finales, libras sobre pulgada cuadrada, se dividió la cantidad de libras por el múltiplo del ancho por largo (área de contacto).

Como la mitad de los cuerpos de prueba tenía corte radial y la otra mitad corte tangencial se hizo una comparación de cómo respondían los cuerpos de prueba según el corte, por ejemplo qué corte es más resistente al esfuerzo de cizalla.

6. Dureza Janka

• Materiales y equipo

- Cubos de madera de cada una de las 3 especies de 2 pulgadas de lado.
- Máquina universal manual
- Deformímetro de anillo
- Una esfera de acero de 1.13 centímetros de diámetro (1)

• Procedimiento

Consistió en hacer que un hemisferio de la esfera de acero penetrara en el cuerpo de prueba mediante la aplicación constante de fuerza (1).

La medición se hizo en el deformímetro de anillo que forma parte del sistema. La fuerza necesaria para que entre el hemisferio se calcula con la ayuda de fórmulas que relacionan la deformación del anillo con la cantidad de fuerza aplicada.



Foto 9. Diseño para la prueba de dureza Janka

Únicamente se tomó el dato de la cantidad de fuerza necesaria para obtener la penetración deseada (1).

Se obtuvieron dos durezas, la lateral (promedio entre radial y tangencial) y axial (12).

El procedimiento se repitió en las dos caras axiales, una radial y una tangencial del cubo. Las penetraciones se hicieron lo suficientemente alejadas de los bordes para prevenir rajaduras o la formación de astillas (1).

CAPITULO V

Resultados y discusión

Comportamiento de la madera en comparación con los materiales isotrópicos. Debido a su heterogeneidad, la madera responde muy imperfectamente a las hipótesis de base de la resistencia de materiales.

Las propiedades de la madera no son las mismas en todas las direcciones, como ocurre en un cubo de acero sometido a la compresión sobre sus caras. En el caso de la madera existen diferencias de resistencias según la carga actúe paralela o transversalmente a las fibras. Igualmente esta última difiere según sea su dirección respecto a los anillos de crecimiento anual, luego la madera es un material anisotrópico dado que sus propiedades resistentes o elásticas no son las mismas en todas sus direcciones. En consecuencia, para definir un esfuerzo en la madera es necesario especificar la dirección de las fuerzas aplicadas con relación a las fibras y a los anillos de crecimiento anual.

Para fines prácticos, la madera puede considerarse como un material “ortotrópico”, es decir, un material que tiene tres planos de simetría elástica mutuamente perpendiculares entre sí: un plano radial, un plano tangencial y un plano transversal. El eje axial es paralelo a las fibras, el eje tangencial es tangente a los anillos de crecimiento y el radial es normal a ellos; en consecuencia al referirse a los esfuerzos en la madera, deben referirse a los planos donde ellos se producen.

Influencia de la especie en las propiedades mecánicas. Las diferentes maderas provienen de distintas especies las que se distinguen cada una de ellas por un plan leñoso característico.

El plan 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, suelo, edad y tratamiento del bosque.

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.

Ensayos mecánicos de la madera. A través de 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. Si las probetas tuvieran defectos, sería prácticamente imposible pues se agrega una perturbación más a las otras que ya se han señalado (influencia de la especie, proveniencia, heterogeneidad).

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.

En general estos ensayos son comparativos y empíricos y no corresponden a ciertas condiciones de empleo bien definidas.

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 paralela a las fibras, si ella es perpendicular a las fibras se denomina compresión perpendicular a las fibras. 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.

Los esfuerzos perpendiculares a la dirección de la fibra (o grano) pueden estar en cualquier ángulo entre 0 y 90 grados con respecto a los anillos de crecimiento. Las propiedades perpendiculares al grano dependen algo de la orientación de los anillos respecto a la dirección de donde proviene el esfuerzo. En algunas especies no hay diferencia entre la orientación 0 grados y la de 90 grados. Otras especies exhiben propiedades de resistencia al esfuerzo de cizalla ligeramente superiores si el cuerpo de prueba se coloca en la posición de 0 grados. Alrededor de la misma cantidad de especies se comporta al revés, siendo más resistente en la posición de 90 grados. Los efectos de las orientaciones intermedias no han sido estudiados a fondo. Los valores del módulo de elasticidad y de la compresión perpendicular a la fibra en el límite proporcional tienden a ser iguales si los anillos se orientan ya sea a 0 o a 45 grados, sin embargo, para algunas especies estas cifras pueden ser desde un 45 hasta un 60% más bajas en la orientación a 45 grados. Para estas especies con propiedades más bajas, las propiedades tienden a ser iguales si se sitúan a 0 o a 90 grados. Por último, para las especies con resultados iguales a 0 y a 45 grados, las cifras son más altas en la orientación a 90 grados.

Compresión paralela a la fibra. La madera, en muchos de sus usos, tales como columnas cortas, soportes, 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. En dichas columnas la carga sobre la cual se produce este esfuerzo se denomina "carga crítica"

Los ensayos de compresión paralela a la fibra se efectúan sobre piezas cortas, donde la altura de la pieza no debe sobrepasar 4 o 5 veces la cota más pequeña de modo de evitar que se produzca el fenómeno de pandeo.

El ensayo muestra que bajo la influencia de la compresión el cuerpo de prueba 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.
- En madera seca al aire: se produce un deslizamiento sobre un plano oblicuo.
- En madera muy húmeda a menudo ocurre un aplastamiento progresivo del cuerpo de prueba.

La ruptura normal es por deslizamiento sobre un plano oblicuo, de aproximadamente 45° 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.

Los ensayos propiamente tales son influenciados por la forma del cuerpo de prueba y por la velocidad de incremento de la carga. Como ya se dijo anteriormente el largo relativo del cuerpo de prueba debe ser tal que se evite el pandeo, la altura que se acostumbra a dar al cuerpo de prueba varía entre 3 a 4 veces la más pequeña dimensión transversal. La forma de la sección de el cuerpo de prueba 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 de 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. En consecuencia para poder hacer comparables los resultados la velocidad de carga debe ser precisada.

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%).

Cuadro 1. Valores de compresión paralela a la fibra tabulados en orden decreciente

Especie	Compresión paralela a la fibra (lb/pulg ²)
Manchiche	9250
Pucté	8625
Palo blanco	3675.43

Cuadro 2. Descripción del tipo de falla presentada en cada cuerpo de prueba

Cuerpo de prueba	Tipo de falla
Palo blanco 1	Aplastante
Palo blanco 2	Cizallante
Palo blanco 3	Cizallante
Manchiche 1	Cizallante
Manchiche 2	Cizallante
Manchiche 3	Aplastante
Manchiche 4	Aplastante
Pucté 1	Cizallante combinada con astillamiento
Pucté 2	Aplastante
Pucté 3	No falló
Pucté 4	Cizallante

Compresión perpendicular a la fibra. La madera es muy poco resistente en el sentido transversal. Este ensayo es muy difícil de realizar, puesto que si se somete un cuerpo de prueba a este tipo de compresión se alcanza muy rápidamente la zona de deformaciones plásticas. Si se traza un diagrama esfuerzos-deformaciones, 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 o creep). 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 esta se produce en la zona donde la carga alcanza el valor constante.

Influencia de la dirección de carga respecto a los anillos de crecimiento. En compresión perpendicular a las fibras existen diferentes valores de resistencia según la fuerza solicitante actúe en sentido tangencial o radial, respecto a los anillos de crecimiento. 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.

Cuadro 3. Valores de compresión perpendicular a la fibra tabulados en orden decreciente

Especie	Compresión perpendicular a la fibra (lb/pulg ²)
Pucté	4083.34
Manchiche	3031.25
Palo blanco	1623.53

Cuadro 4. Descripción del tipo de falla presentada en cada cuerpo de prueba

Cuerpo de prueba	Tipo de falla	Posición de la pieza
Palo blanco 1	Aplastamiento severo	Anillos paralelos apuntando a la cara izquierda
Palo blanco 2	Aplastamiento severo	Anillos apuntando a la esquina inferior izquierda
Palo blanco 3	Aplastamiento severo	Anillos apuntando a la esquina superior

		izquierda
Manchiche 1	Aplastamiento leve	Anillos apuntando a la cara izquierda
Manchiche 2	Aplastamiento leve	Anillos apuntando a la cara inferior
Manchiche 3	Aplastamiento leve	Anillos apuntando a la cara izquierda
Manchiche 4	Acuñada radial	Anillos apuntando a la esquina inferior derecha
Pucté 1	Aplastamiento moderado, radiales	Anillos apuntando a la esquina inferior derecha
Pucté 2	Aplastamiento moderado, radiales	Anillos apuntando a la esquina superior izquierda
Pucté 3	Radiales	Anillos apuntando a la esquina inferior izquierda
Pucté 4	Radiales	Anillos apuntando a la esquina superior izquierda

Resistencia al cizalle. La resistencia de la madera al cizalle depende de la orientación de las fuerzas aplicadas en relación a la dirección de las fibras y de la manera en que el esfuerzo es producido.

En cuanto a la orientación de las fuerzas se pueden distinguir los siguientes tipos de cizalle: Cizalle paralelo o longitudinal (pudiendo ser tangencial o radial) y cizalle transversal o normal.

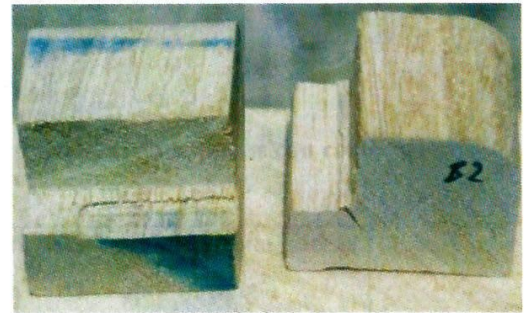


Foto 9. Diferencia entre fallas tangencial y radial, respectivamente

La experiencia muestra que en el cizallamiento transversal antes de que este alcance su resistencia máxima se produce una compresión transversal produciendo un rompimiento de fibras. Es así, que en la práctica solamente se toma en cuenta el cizalle longitudinal o paralelo, que es el que más afecta especialmente en piezas ensambladas.

En cuanto a la manera en la cual el esfuerzo es producido se distinguen numerosos casos donde el cizallamiento se produce de manera diferente. Diversas normas de ensayo, estudian el cizallamiento longitudinal mediante ensayos hechos por compresión o por tracción. En efecto, esfuerzos de cizalle se producen en una pieza que está sometida a tracción o compresión directa. El esfuerzo máximo de cizalle se produce a lo largo de un plano que forma un ángulo de 45° con respecto al eje longitudinal. Todos estos ensayos de cizallamiento que permiten obtener rupturas longitudinales dan resultados sensiblemente diferentes; en el caso de la compresión la dilatación lateral favorece la ruptura mientras que en tracción, la contracción lateral la dificulta. Así pues es difícil de obtener un esfuerzo de cizalle puro sin que intervengan otros fenómenos, el ensayo de torsión es el que da mejores valores de resistencia al cizalle de la madera, en este caso, se opera sobre probetas cilíndricas produciéndose la ruptura según las capas anuales de crecimiento (longitudinalmente) sin embargo, la anisotropía de la madera no permite la aplicación correcta de las fórmulas clásicas establecidas para este tipo de esfuerzos, sirviendo los resultados sólo a título comparativos.

Cuadro 5. Valores de resistencia al esfuerzo de cizalla, piezas con corte radial tabulados en orden decreciente

Especie	Resistencia al esfuerzo de cizalla, piezas con corte radial (lb/pulg²)
Pucté	5254.69
Manchiche	4146.52
Palo blanco	937.99

Cuadro 6. Valores de resistencia al esfuerzo de cizalla, piezas con corte tangencial tabulados en orden decreciente

Especie	Resistencia al esfuerzo de cizalla, piezas con corte tangencial (lb/pulg²)
Pucté	11557.48
Manchiche	11484
Palo blanco	1366.26

Cuadro 7. Descripción del tipo de falla presentada en cada cuerpo de prueba

Cuerpo de prueba	Tipo de falla / posición de la pieza
Palo blanco 1	Radial
Palo blanco 2	Radial
Palo blanco 3	Radial
Palo blanco 4	Radial
Palo blanco 5	Tangencial
Palo blanco 6	Tangencial
Palo blanco 7	Tangencial
Palo blanco 8	Tangencial

Manchiche 1	Radial
Manchiche 2	Radial
Manchiche 3	Radial
Manchiche 4	Radial
Manchiche 5	Tangencial
Manchiche 6	Tangencial
Manchiche 7	Tangencial
Manchiche 8	Tangencial
Pucté 1	Radial
Pucté 2	Radial
Pucté 3	Radial
Pucté 4	Radial
Pucté 5	Tangencial
Pucté 6	Tangencial
Pucté 7	Tangencial
Pucté 8	Tangencial

Resistencia a la flexión estática. Como ya se vio anteriormente la flexión es un esfuerzo compuesto, en el que intervienen al mismo tiempo esfuerzos de tracción, compresión y esfuerzos de cizalle o cortantes.

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. 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 periodos 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).
- En un diagrama de esfuerzos de flexión sobre una sección transversal recta se observa que hay dos áreas iguales, la resultante de los esfuerzos de tracción y la resultante de las compresiones. La existencia de un momento flector origina la igualdad de estas resultantes, pero en razón a la forma diferente de las curvas (debido a la falta de proporcionalidad entre los esfuerzos y deformaciones, especialmente en compresión) y siendo el diagrama de tracción mucho más abierto, es necesario considerar que su origen común se desplaza hacia la región traccionada. En efecto, se demuestra que sobre vigas de madera en flexión, el plano neutro desciende hacia la parte traccionada.
- El esfuerzo de cizallamiento longitudinal que da origen 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.

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. La influencia de los diferentes factores que intervienen en el valor del esfuerzo son:

- Influencia de la relación longitud-altura de la viga. Existe una relación óptima que se sitúa entre $L/h=14$.
- 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.

- 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.
- En las probetas pequeñas es más fácil obtener que éstas sean libres de defectos y que las fibras sean exactamente paralelas al eje, lo que hace mucho más difícil de obtener en probetas de dimensiones mayores.
- 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.
- La influencia del esfuerzo cortante es mucho mayor en el caso de vigas de gran altura.

Resultados de los ensayos. 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 y en consecuencia es en este sentido que se efectúa el ensayo. La velocidad de aplicación de la carga tiene gran importancia. Si la velocidad es elevada se obtienen valores de esfuerzo también elevados.

En este caso, el diseño experimental debe ser revisado y modificado posteriormente, ya que se obtuvieron resultados (matemático) que no concordaban con los valores teóricos (gráfico y Gurfinkel). Se obtiene un error de una magnitud, es decir, 10 en lugar de 100. El mismo error ha ocurrido cuando otros grupos han hecho esta misma prueba.

Cuadro 8. Valores de módulo de flexión tabulados en orden decreciente

Especie	Módulo de flexión ($\times 10^6$ lb/pulg ²)
Pucté	2.44
Manchiche	2.20
Palo blanco	1.44

Cuadro 9. Valores de módulo de ruptura tabulados en orden decreciente

Especie	Módulo de ruptura (lb/pulg ²)
Manchiche	15046.88
Pucté	14067.19
Palo blanco	7968.75

Cuadro 10. Descripción del tipo de falla presentada en cada cuerpo de prueba

Cuerpo de prueba	Tipo de falla	Posición de la pieza
Palo blanco 1	Tensión del grano cruzado combinada con tensión no astillante	Anillos paralelos apuntando a la cara izquierda
Palo blanco 2	Tensión del grano cruzado combinada con tensión astillante	Anillos apuntando a la esquina inferior izquierda
Palo blanco 3	Tensión del grano cruzado combinada con tensión no astillante	Anillos apuntando a la esquina superior izquierda
Palo blanco 4	Tensión del grano cruzado combinada con tensión	Anillos apuntando a la esquina superior derecha

	astillante	
Manchiche 1	Tensión del grano cruzado combinada con tensión no astillante	Anillos apuntando a la esquina superior derecha
Manchiche 2	Tensión del grano cruzado combinada con tensión no astillante	Anillos apuntando a la esquina superior izquierda
Manchiche 3	Tensión del grano cruzado combinada con tensión astillante	Anillos apuntando a la esquina superior derecha
Manchiche 4	Tensión del grano cruzado combinada con tensión astillante	Anillos apuntando a la esquina superior izquierda
Pucté 1	Compresión. No falló, solamente se curvó	Anillos apuntando a la esquina superior derecha.
Pucté 2	Tensión del grano cruzado combinada con tensión no astillante	Anillos apuntando a la esquina superior derecha
Pucté 3	Tensión del grano cruzado combinada con tensión no astillante	Anillos apuntando a la esquina superior izquierda
Pucté 4	Tensión del grano	Anillos apuntando a la

	cruzado combinada con tensión astillante	esquina inferior izquierda
--	--	-------------------------------

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

Dada la heterogeneidad de la madera es difícil definir la dureza por un ensayo, puesto que para una misma probeta se tiene madera blanda y madera más dura según la estación. 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 lateral 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. La dureza es afectada grandemente por la humedad de la madera puesto 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.

Cuadro 11. Valores de dureza Janka axial tabulados en orden decreciente

Especie	Dureza Janka axial (lb)
Manchiche	2407.96
Pucté	1803.00
Palo blanco	1083.38

Cuadro 12. Valores de dureza Janka lateral tabulados en orden decreciente

Especie	Dureza Janka lateral (lb)
Manchiche	2269.57
Pucté	2095.59
Palo blanco	827.69

Cuadro 13. Descripción del tipo de falla presentada en cada cuerpo de prueba

Cuerpo de prueba	Tipo de falla	Posición de la pieza
Palo blanco 1	Ninguna	Una radial, una tangencial y dos axiales
Palo blanco 2	Ninguna	Una radial, una tangencial y dos axiales
Palo blanco 3	Ninguna	Una radial, una tangencial y dos axiales
		Una radial, una tangencial y dos axiales
Manchiche 1	Ninguna	Una radial, una tangencial y dos axiales
Manchiche 2	Ninguna	Una radial, una tangencial y dos axiales
Manchiche 3	Ninguna	Una radial, una tangencial y dos axiales
		Una radial, una tangencial y dos axiales
Pucté 1	Ninguna	Una radial, una tangencial y dos axiales
Pucté 2	Se partió en dos antes de completar la primera prueba.	Una axial

	Sólo se obtuvo un resultado parcial.	
Pucté 3	Rajaduras parciales, se omitieron el resto de las pruebas, so pena de romperse la pieza	Una radial y una axial
Pucté 4	Rajaduras parciales, se omitieron el resto de las pruebas, so pena de romperse la pieza	Una radial y dos axiales

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el palo blanco se concluye lo siguiente:

- Módulo de elasticidad: $1.44 * 10^6$ lb/pulg²
- Módulo de ruptura: 7968.75 lb/pulg²
- Resistencia a la compresión paralela a la fibra: 4900.57 lb/pulg²
- Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra: 2164.71 lb/pulg²
- Esfuerzo de cizalla radial: 937.99 lb/pulg²
- Esfuerzo de cizalla tangencial: 1366.26 lb/pulg²
- Dureza Janka axial: 1083.38 lb/pulg²
- Dureza Janka lateral: 827.69 lb/pulg²

Para el manchiche se concluye lo siguiente:

- Módulo de elasticidad: $2.20 * 10^6$ lb/pulg²
- Módulo de ruptura: 15046.88 lb/pulg²
- Resistencia a la compresión paralela a la fibra: 9250.00 lb/pulg²
- Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra: 3031.25 lb/pulg²
- Esfuerzo de cizalla radial: 4146.52 lb/pulg²
- Esfuerzo de cizalla tangencial: 11484.00 lb/pulg²
- Dureza Janka axial: 2407.96 lb/pulg²
- Dureza Janka lateral: 2269.57 lb/pulg²

Para el pucté se concluye lo siguiente:

- Módulo de elasticidad: $2.44 * 10^6$ lb/pulg²
- Módulo de ruptura: 14067.19 lb/pulg²
- Resistencia a la compresión paralela a la fibra: 8625.00 lb/pulg²
- Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra: 4083.33 lb/pulg²
- Esfuerzo de cizalla radial: 5254.69 lb/pulg²
- Esfuerzo de cizalla tangencial: 11557.48 lb/pulg²
- Dureza Janka axial 1803.00 lb/pulg²

- Dureza Janka lateral: 2095.59 lb/pulg²

- Según los resultados obtenidos para cada especie, el palo blanco puede ser usado para aplicaciones en donde se requiera una elasticidad y peso bajo, como mueblería fina. No así para trabajo pesado, porque no resiste mucho a las compresiones y no es lo suficientemente duro.

- Ni el pucté ni el manchiche deben emplearse para construcción en donde sea requerida elasticidad en el material, pues ambas maderas llegan al punto en donde se quiebran demasiado pronto. Sin embargo pueden ser usadas hasta cierto punto como columnas por su resistencia a la compresión. Se debe tener cuidado que la relación altura-base no sea lo suficientemente grande como para propiciar una ruptura.

- El manchiche puede usarse para pisos, decks y parquet por su dureza y por su color y veteado característicos, propiedades que hacen de esta madera una opción muy elegante para decoración. El pucté puede usarse para decks y barandas en exteriores, y también para pisos, aunque de ser así, debe teñirse para emparejar el color de la madera. Si ha de usarse en exteriores, se recomienda tratar la madera con algún preservante para que dure aún más tiempo. Se podría elaborar mueblería con estas maderas, pero ambas son demasiado pesadas para que su transporte y movimiento sea fácil.

- Si la madera es sometida a un esfuerzo de cizalla, el corte que debe usarse es el tangencial, ya que es este corte es más resistente que el radial para las especies en estudio.

- Se debe revisar el diseño experimental para las pruebas de flexión, ya que ha ocurrido el mismo error en estudios anteriores llevados a cabo bajo el mismo esquema. El resultado gráfico no coincide con el teórico ni con el matemático.

- Procurar realizar todas las pruebas iguales en el mismo día para que haya igualdad de condiciones, calibración de los aparatos de medición y de las máquinas.

LITERATURA CITADA

1. *Annual Book of ASTM Standards; Section 4 Construction; Volume 04.09 Wood*. 1988. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA. 6 vols.
2. Cabrera, Claudio. *Síntesis histórica de la deforestación en Guatemala*. Guatemala. 7 págs.
3. Chudnoff, Martin. 1984. *Tropical Timbers of the World*. USDA Forest Service. Ag. Handbook No. 607.
4. Coronel, Eduardo. 1994. <<Variación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de especies nativas y cultivadas en el Chaco argentino>>. *Quebracho* [Argentina]. (2): 14-20.
5. *Dataforg, Base de Datos Forestales de Guatemala Versión 2.0*. 2001. Instituto Nacional de Bosques, INAB. Guatemala.
6. Escobar, Jorge. 2001. *Notas inéditas de clase del curso Tecnología de la Madera*. Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala.
7. Francis, John K. 1989. *Bucida buceras* L. Ucar. SO-ITF-SM-18. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 4 p.

8. Francis, John K. 1989. *Tabebuia donnell-smithii* Rose. SO-ITF-SM-25. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 4 p.
9. Green, D; J. Winandy y D. Kretschmann. 1999. <<Chapter 4: Mechanical Properties of Wood>>. En *Wood handbook. Wood as an engineering material*, de Forest Products Laboratory. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 págs.
10. Guatemala. 1998. Congreso de la República. *Ley Forestal, Decreto Legislativo Número 101-96*. Guatemala, Asociación Centroamericana para el Desarrollo Humano "Hombres de Maíz". 28 págs.
11. Karsulovic, José T. 1994. *Propiedades mecánicas de la madera*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias agrarias y forestales, Departamento de tecnología de la madera.
12. Kukachka, B.F., T.A. McClay, y E. Beltranena M. 1968. *Propiedades seleccionadas de 52 especies de madera del Departamento del Peten, Guatemala*. Proyecto de Evaluación Forestal. FAO-FYDEP. 88 págs.
13. <<Maderas del Petén>>. 2003. Inversiones para la paz. *Data Export*. 135 (7): 26.

LITERATURA ESCOGIDA

Breyer, D. 1988. *Design of Wood Structures*. 2a ed. Nueva York, McGraw-Hill Book Company. 680 págs.

Classic Wood Structures. 1989. New York, American Society Of Civil Engineers. 241 págs.

Conejos, J. y J. Arroyo. 1972. *Propiedades y características de sangre de drago (Pterocarpus vernalis) y sangrito (Pterocarpus aff. P. Rohrii)*. Mérida, Venezuela, Laboratorio Nacional de Productos Forestales.

Garfinkel, G. 1981. *Wood Engineering*. 2a ed. Southern Forest Products, Association. Kendal/Hunt Publishing Company. 552 págs.

Gentry, J.L. y P.C. Standley. <<Flora of Guatemala>>. *Fieldania: Botany*. [Field Museum of Natural History] 24 (V): 278-279.

Gentry, J.L. y P.C. Standley. 1974. <<Flora of Guatemala>>. *Fieldania: Botany*. [Field Museum of Natural History] 24 (VII): 269-270.

Gentry, J.L. y P.C. Standley. 1974. <<Flora of Guatemala>>. *Fieldania: Botany*. [Field Museum of Natural History] 24 (X): 218-220.

Groneman, C. y E. Glazener. 1976. *Technical Woodworking*. 2a ed. Nueva York, McGraw-Hill Book Company. 434 págs.

- León, A. 1994. *Propiedades físicas de la madera*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias agrarias y forestales, Departamento de tecnología de la madera.
- Macropaedia*. 1998. The New Encyclopaedia Britannica. 15a ed. Londres.
- Manual de diseño para maderas del grupo andino*. 1984. 3ª ed. Perú, Junta del acuerdo de Cartagena.
- Miller, R. 1999. <<Chapter 2: Structure of Wood>>. En *Wood handbook. Wood as an engineering material*, de Forest Products Laboratory. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 págs.
- Peña, S. y F. Jiménez. 1996. *Tecnología de la madera*. Madrid, V.A. Impresiones, S.A. 602 págs.
- Simpson, W. y A. TenWolde. 1999. <<Chapter 3: Physical Properties and Moisture Relations of Wood>>. En *Wood handbook. Wood as an engineering material*, de Forest Products Laboratory. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 págs.
- Soltis, L. 1999. <<Chapter 8: Structural Analysis Equations>>. En *Wood handbook. Wood as an engineering material*, de Forest Products Laboratory. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 págs.

Tablas de propiedades físicas y mecánicas de la madera de 20 especies de Venezuela.

1981. Proyectos andinos de desarrollo tecnológico en el área de recursos forestales tropicales. Lima.

Vilela, J.E. 1969. *Propiedades físicas y mecánicas de 137 maderas de la Guayana Venezolana.* Mérida, Laboratorio Nacional de Productos Forestales.

Wood structural design data. 1986. Washington, D.C., National Forest Products Association. 240 págs.

Wood structures. A design guide and commentary. 1975. Nueva York, American Society of Civil Engineers. 416 págs.

APÉNDICES

Resultados completos de cada prueba, ordenados por especie

Palo blanco

Manchiche

Pucté

Fotografías

Palo blanco

Fallas causadas por ruptura

Fallas causadas por compresión paralela a la fibra

Fallas causadas por compresión perpendicular a la fibra

Fallas causadas por el esfuerzo de cizalla

Dureza Janka

Manchiche

Fallas causadas por ruptura

Fallas causadas por compresión paralela a la fibra

Fallas causadas por el esfuerzo de cizalla

Dureza Janka

Pucté

Fallas causadas por compresión paralela a la fibra

Fallas causadas por compresión perpendicular a la fibra

Fallas causadas por el esfuerzo de cizalla

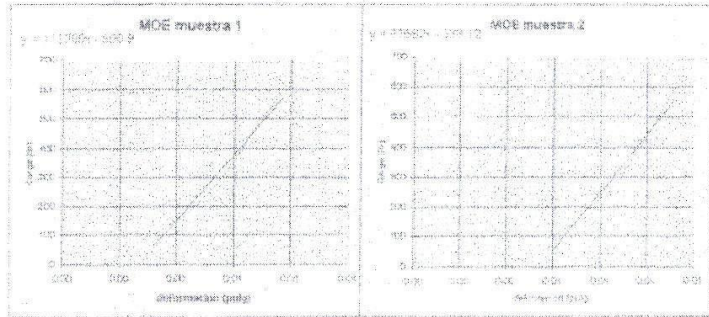
Dureza Janka

MODELO DE ELASTICIDAD

Muestra No.	Largo (cm)	Lujo (cm)	No. Vueltas	Deformación (cm)	Carga (gr)	Alte (cm)	Carga (N)	MOR (N/cm ²)
1	20	0.67	0.30	0.00	0	0	0.00	0.00
	20	0.67	0.30	0.00	0	0	0.00	0.00
	20	0.67	0.30	0.00	0	0	0.00	0.00
	20	0.67	0.30	0.00	0	0	0.00	0.00
	20	0.67	0.30	0.00	0	0	0.00	0.00
2	20	0.67	0.30	0.00	0	0	0.00	0.00
	20	0.67	0.30	0.00	0	0	0.00	0.00
	20	0.67	0.30	0.00	0	0	0.00	0.00
	20	0.67	0.30	0.00	0	0	0.00	0.00
	20	0.67	0.30	0.00	0	0	0.00	0.00

MOR según Desfines (N/cm²)
0.000000

MOR según Desfines (N/cm²)
0.000000



MODELO DE RUPTEZA

Muestra No.	Carga (gr)	Alte (cm)	Largo (cm)	Fuerza (N)	Módulo de ruptura (N/cm ²)	Módulo de ruptura (N/cm ²)
1	0	0	30	0.00	0.0000	0.0000
1	2	0	30	0.02	0.0000	0.0000
1	4	0	30	0.04	0.0000	0.0000
1	6	0	30	0.06	0.0000	0.0000

Cuadro 193. Resultados completos pruebas Desfines y ruptura

RESISTENCIA A LA COMPRESION PARALELA A LA FIBRA

Muestra No.	Ancho (pulg)	Alto (pulg)	Largo (pulg)	Area (ancho*alto) (pulg ²)	Carga (lb)	Compresion (lb/pulg ²)
1	1.31	1.03	4.00	1.35	16500.00	12137.80
2	1.33	1.03	4.00	1.37	15500.00	11313.86
3	1.31	1.13	4.00	1.48	16000.00	10810.81

RESISTENCIA A LA COMPRESION PERPENDICULAR A LA FIBRA

Muestra No.	Ancho (pulg)	Alto (pulg)	Largo (pulg)	Area (ancho*largo) (pulg ²)	Carga (lb)	Compresion (lb/pulg ²)
1	1.31	1.03	4.00	5.24	3500.00	668.13
2	1.33	1.03	4.00	5.32	3800.00	714.28
3	1.31	1.13	4.00	5.72	3000.00	522.71

RESISTENCIA DE FIZALLA RADIAL

Muestra No.	Ancho (pulg)	Largo (pulg)	Area (ancho*largo) (pulg ²)	No. Vueltas	Carga (lb)	Corte (lb/pulg ²)
1	0.44	1.07	0.47	4	411.21	870.23
2	0.47	1.09	0.51	4	450.75	884.41
3	0.46	1.09	0.50	4	529.83	1059.66
4	0.46	1.09	0.50	4	343.14	686.28
5	0.45	1.01	0.45	4	442.84	984.54
6	0.44	1.09	0.48	4	601.00	1252.08

RESISTENCIA DE FIZALLA TANGENCIAL

Muestra No.	Ancho (pulg)	Largo (pulg)	Area (ancho*largo) (pulg ²)	No. Vueltas	Carga (lb)	Corte (lb/pulg ²)
1	0.48	1.10	0.53	4	664.26	1253.30
2	0.46	1.14	0.52	4	814.54	1568.33
3	0.46	1.17	0.54	4	664.26	1230.85
4	0.43	1.17	0.50	4	751.25	1502.50
5	0.41	1.17	0.48	4	751.25	1565.10

FUERZA TANICA AXIAL

Muestra No.	No. Vueltas	Durata (lb)
7A	1.00	804.87
7B	1.27	1062.38
7C	1.05	1180.50
7D	1.40	1120.11
7E	1.47	1184.46
7F	1.43	1130.53
		1093.36

FUERZA TANICA LATERAL

Muestra No.	No. Vueltas	Durata (lb)
10	0.92	727.59
10C	1.25	988.69
10D	1.23	972.87
10E	0.92	727.53
10F	1.15	989.41
10G	0.81	646.34
		827.49

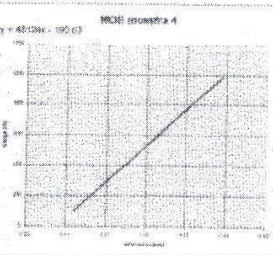
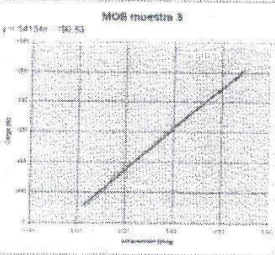
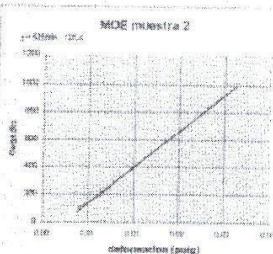
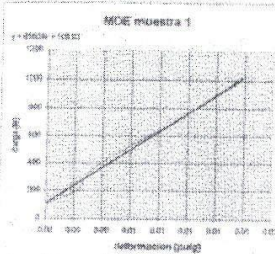
El cuadro F-35. Resultados completos de las pruebas de compresión, cizalla y fuerza

MODELO LINEAL

Muestra No.	Carga (kg)	Def. (mm)	Def. (micras)	Diferencia (micras)	Carga (grms)	Def. (micras)	Carga (grms)	Def. (micras)
1	10	0.10	100	0.00	10	0.10	100	0.00
2	20	0.20	200	0.00	20	0.20	200	0.00
3	30	0.30	300	0.00	30	0.30	300	0.00
4	40	0.40	400	0.00	40	0.40	400	0.00
5	50	0.50	500	0.00	50	0.50	500	0.00
6	60	0.60	600	0.00	60	0.60	600	0.00
7	70	0.70	700	0.00	70	0.70	700	0.00
8	80	0.80	800	0.00	80	0.80	800	0.00
9	90	0.90	900	0.00	90	0.90	900	0.00
10	100	1.00	1000	0.00	100	1.00	1000	0.00
11	110	1.10	1100	0.00	110	1.10	1100	0.00
12	120	1.20	1200	0.00	120	1.20	1200	0.00
13	130	1.30	1300	0.00	130	1.30	1300	0.00
14	140	1.40	1400	0.00	140	1.40	1400	0.00
15	150	1.50	1500	0.00	150	1.50	1500	0.00
16	160	1.60	1600	0.00	160	1.60	1600	0.00
17	170	1.70	1700	0.00	170	1.70	1700	0.00
18	180	1.80	1800	0.00	180	1.80	1800	0.00
19	190	1.90	1900	0.00	190	1.90	1900	0.00
20	200	2.00	2000	0.00	200	2.00	2000	0.00
21	210	2.10	2100	0.00	210	2.10	2100	0.00
22	220	2.20	2200	0.00	220	2.20	2200	0.00
23	230	2.30	2300	0.00	230	2.30	2300	0.00
24	240	2.40	2400	0.00	240	2.40	2400	0.00
25	250	2.50	2500	0.00	250	2.50	2500	0.00
26	260	2.60	2600	0.00	260	2.60	2600	0.00
27	270	2.70	2700	0.00	270	2.70	2700	0.00
28	280	2.80	2800	0.00	280	2.80	2800	0.00
29	290	2.90	2900	0.00	290	2.90	2900	0.00
30	300	3.00	3000	0.00	300	3.00	3000	0.00
31	310	3.10	3100	0.00	310	3.10	3100	0.00
32	320	3.20	3200	0.00	320	3.20	3200	0.00
33	330	3.30	3300	0.00	330	3.30	3300	0.00
34	340	3.40	3400	0.00	340	3.40	3400	0.00
35	350	3.50	3500	0.00	350	3.50	3500	0.00
36	360	3.60	3600	0.00	360	3.60	3600	0.00
37	370	3.70	3700	0.00	370	3.70	3700	0.00
38	380	3.80	3800	0.00	380	3.80	3800	0.00
39	390	3.90	3900	0.00	390	3.90	3900	0.00
40	400	4.00	4000	0.00	400	4.00	4000	0.00
41	410	4.10	4100	0.00	410	4.10	4100	0.00
42	420	4.20	4200	0.00	420	4.20	4200	0.00
43	430	4.30	4300	0.00	430	4.30	4300	0.00
44	440	4.40	4400	0.00	440	4.40	4400	0.00
45	450	4.50	4500	0.00	450	4.50	4500	0.00
46	460	4.60	4600	0.00	460	4.60	4600	0.00
47	470	4.70	4700	0.00	470	4.70	4700	0.00
48	480	4.80	4800	0.00	480	4.80	4800	0.00
49	490	4.90	4900	0.00	490	4.90	4900	0.00
50	500	5.00	5000	0.00	500	5.00	5000	0.00

Muestra No. 1 (10kg)

Muestra No. 2 (20kg)



Muestra No.	Carga (kg)	Def. (mm)	Def. (micras)	Diferencia (micras)	Carga (grms)	Def. (micras)	Carga (grms)	Def. (micras)
1	10	0.10	100	0.00	10	0.10	100	0.00
2	20	0.20	200	0.00	20	0.20	200	0.00
3	30	0.30	300	0.00	30	0.30	300	0.00
4	40	0.40	400	0.00	40	0.40	400	0.00
5	50	0.50	500	0.00	50	0.50	500	0.00
6	60	0.60	600	0.00	60	0.60	600	0.00
7	70	0.70	700	0.00	70	0.70	700	0.00
8	80	0.80	800	0.00	80	0.80	800	0.00
9	90	0.90	900	0.00	90	0.90	900	0.00
10	100	1.00	1000	0.00	100	1.00	1000	0.00
11	110	1.10	1100	0.00	110	1.10	1100	0.00
12	120	1.20	1200	0.00	120	1.20	1200	0.00
13	130	1.30	1300	0.00	130	1.30	1300	0.00
14	140	1.40	1400	0.00	140	1.40	1400	0.00
15	150	1.50	1500	0.00	150	1.50	1500	0.00
16	160	1.60	1600	0.00	160	1.60	1600	0.00
17	170	1.70	1700	0.00	170	1.70	1700	0.00
18	180	1.80	1800	0.00	180	1.80	1800	0.00
19	190	1.90	1900	0.00	190	1.90	1900	0.00
20	200	2.00	2000	0.00	200	2.00	2000	0.00
21	210	2.10	2100	0.00	210	2.10	2100	0.00
22	220	2.20	2200	0.00	220	2.20	2200	0.00
23	230	2.30	2300	0.00	230	2.30	2300	0.00
24	240	2.40	2400	0.00	240	2.40	2400	0.00
25	250	2.50	2500	0.00	250	2.50	2500	0.00
26	260	2.60	2600	0.00	260	2.60	2600	0.00
27	270	2.70	2700	0.00	270	2.70	2700	0.00
28	280	2.80	2800	0.00	280	2.80	2800	0.00
29	290	2.90	2900	0.00	290	2.90	2900	0.00
30	300	3.00	3000	0.00	300	3.00	3000	0.00
31	310	3.10	3100	0.00	310	3.10	3100	0.00
32	320	3.20	3200	0.00	320	3.20	3200	0.00
33	330	3.30	3300	0.00	330	3.30	3300	0.00
34	340	3.40	3400	0.00	340	3.40	3400	0.00
35	350	3.50	3500	0.00	350	3.50	3500	0.00
36	360	3.60	3600	0.00	360	3.60	3600	0.00
37	370	3.70	3700	0.00	370	3.70	3700	0.00
38	380	3.80	3800	0.00	380	3.80	3800	0.00
39	390	3.90	3900	0.00	390	3.90	3900	0.00
40	400	4.00	4000	0.00	400	4.00	4000	0.00
41	410	4.10	4100	0.00	410	4.10	4100	0.00
42	420	4.20	4200	0.00	420	4.20	4200	0.00
43	430	4.30	4300	0.00	430	4.30	4300	0.00
44	440	4.40	4400	0.00	440	4.40	4400	0.00
45	450	4.50	4500	0.00	450	4.50	4500	0.00
46	460	4.60	4600	0.00	460	4.60	4600	0.00
47	470	4.70	4700	0.00	470	4.70	4700	0.00
48	480	4.80	4800	0.00	480	4.80	4800	0.00
49	490	4.90	4900	0.00	490	4.90	4900	0.00
50	500	5.00	5000	0.00	500	5.00	5000	0.00

Crear una lista de resultados completa para cada muestra y figura.

RESISTENCIA A LA COMPRESION PARALELA A LA FIBRA

Muestra No.	Ancho (pulg)	Alto (pulg)	Longo (pulg)	Area (ancho*largo) (pulg ²)	Fuerza (lb)	Compresion (lb/pulg ²)
1	2	2	8	16	3750	234.38
2	2	2	8	16	3630	226.88
3	2	2	8	16	3650	228.13
4	2	2	8	16	3600	225.00

RESISTENCIA A LA COMPRESION PERPENDICULAR A LA FIBRA

Muestra No.	Ancho (pulg)	Alto (pulg)	Longo (pulg)	Area (ancho*largo) (pulg ²)	Fuerza (lb)	Compresion (lb/pulg ²)
1	2	2	8	16	3600	225.00
2	2	2	8	16	3500	218.75
3	2	2	8	16	3400	212.50
4	2	2	8	16	3400	212.50

ESFUERZO DE TENSION RADIAL

Muestra No.	Ancho (pulg)	Longo (pulg)	Area (ancho*largo) (pulg ²)	No. Vueltas	Carga (lb)	Corte (lb/pulg ²)
1	0.20	1.04	0.21	0.80	452.95	2156.91
2	0.20	1.05	0.21	1.10	469.87	2237.48
3	0.16	1.05	0.17	1.30	475.47	2800.43
4	0.20	1.04	0.21	1.30	475.30	2263.33

ESFUERZO DE TENSION TANGENCIAL

Muestra No.	Ancho (pulg)	Longo (pulg)	Area (ancho*largo) (pulg ²)	No. Vueltas	Carga (lb)	Corte (lb/pulg ²)
1	0.24	0.99	0.24	1.20	340.42	1418.42
2	0.24	0.95	0.23	1.50	343.43	1493.60
3	0.20	1.05	0.21	1.80	340.51	1624.81
4	0.24	1.00	0.24	2.30	318.51	1327.13

ASIALES

Muestra No.	No. Vueltas	Dureza (lb)
1A	3.33	2475.17
2A	3.34	2498.90
3A	2.99	2293.29
1B	3.15	2499.94
2B	3.63	2396.00
3B	2.90	2284.20
		2407.96

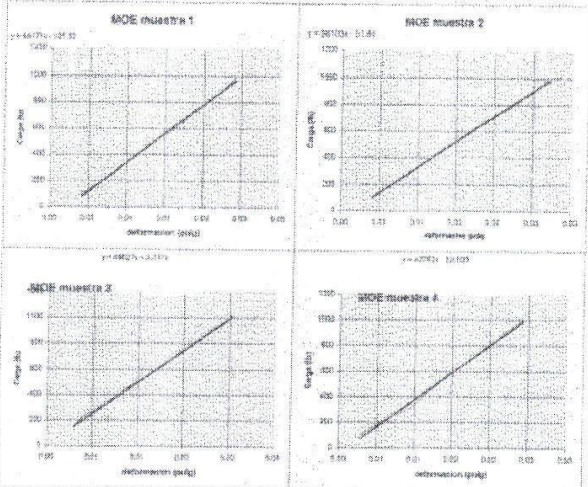
LATERALES

Muestra No.	No. Vueltas	Dureza (lb)
1C	3.50	2372.37
2C	2.83	2257.94
3C	3.24	2174.67
1D	2.54	2008.63
2D	3.30	2451.45
3D	3.00	2372.37
		2269.87

Cuadro NIV. Resultados completos de los pruebos de compresion, corte y dureza

MONITORING ESTIMATED

Monitor No.	Range (mg/dl)	Last (mg/dl)	No. Samples	Reference Range (mg/dl)	Monitor (mg/dl)	Date (mm/dd)	Interpretation	Change (mg/dl)	Notes (mg/dl)
1	20-30	28	10	0-10	0.00	1/1	1	1.00	10.00
2	20-30	25	10	0-10	0.00	1/2	2	1.00	10.00
3	20-30	25	10	0-10	0.00	1/3	3	1.00	10.00
4	20-30	25	10	0-10	0.00	1/4	4	1.00	10.00
5	20-30	25	10	0-10	0.00	1/5	5	1.00	10.00
6	20-30	25	10	0-10	0.00	1/6	6	1.00	10.00
7	20-30	25	10	0-10	0.00	1/7	7	1.00	10.00
8	20-30	25	10	0-10	0.00	1/8	8	1.00	10.00
9	20-30	25	10	0-10	0.00	1/9	9	1.00	10.00
10	20-30	25	10	0-10	0.00	1/10	10	1.00	10.00
11	20-30	25	10	0-10	0.00	1/11	11	1.00	10.00
12	20-30	25	10	0-10	0.00	1/12	12	1.00	10.00
13	20-30	25	10	0-10	0.00	1/13	13	1.00	10.00
14	20-30	25	10	0-10	0.00	1/14	14	1.00	10.00
15	20-30	25	10	0-10	0.00	1/15	15	1.00	10.00
16	20-30	25	10	0-10	0.00	1/16	16	1.00	10.00
17	20-30	25	10	0-10	0.00	1/17	17	1.00	10.00
18	20-30	25	10	0-10	0.00	1/18	18	1.00	10.00
19	20-30	25	10	0-10	0.00	1/19	19	1.00	10.00
20	20-30	25	10	0-10	0.00	1/20	20	1.00	10.00
21	20-30	25	10	0-10	0.00	1/21	21	1.00	10.00
22	20-30	25	10	0-10	0.00	1/22	22	1.00	10.00
23	20-30	25	10	0-10	0.00	1/23	23	1.00	10.00
24	20-30	25	10	0-10	0.00	1/24	24	1.00	10.00
25	20-30	25	10	0-10	0.00	1/25	25	1.00	10.00
26	20-30	25	10	0-10	0.00	1/26	26	1.00	10.00
27	20-30	25	10	0-10	0.00	1/27	27	1.00	10.00
28	20-30	25	10	0-10	0.00	1/28	28	1.00	10.00
29	20-30	25	10	0-10	0.00	1/29	29	1.00	10.00
30	20-30	25	10	0-10	0.00	1/30	30	1.00	10.00



MONITORING ESTIMATED

Monitor No.	Start (mg/dl)	End (mg/dl)	Range (mg/dl)	Phase (hr)	Volume (ml)	Notes (mg/dl)
1	0	30	30	0.00	1000	
2	30	60	30	0.00	1000	
3	60	90	30	0.00	1000	
4	90	120	30	0.00	1000	

Figure 10: Example of a typical monitor graph.

RESISTENCIA A LA COMPRESION PARALELA A LA FIBRA

Muestra No.	Ancho (polg)	Alto (polg)	Largo (polg)	Area (ancho*largo) (polg ²)	Fuerza (lb)	Compresion (lb/polg ²)
1	2	2	8	4	3200	800.00
2	2	2	8	4	3350	837.50
3	2	2	8	4	3500	875.00
4	2	2	8	4	3600	900.00
						865.64

RESISTENCIA A LA COMPRESION PERPENDICULAR A LA FIBRA

Muestra No.	Ancho (polg)	Alto (polg)	Largo (polg)	Area (ancho*largo) (polg ²)	Fuerza (lb)	Compresion (lb/polg ²)
1	2	2	6	12	5200	433.33
2	2	2	6	12	3780	315.00
3	2	2	6	12	5000	416.67
4	2	2	6	12	4850	404.17
						408.33

ENSUEÑO DE CIZALLA RADIAL

Muestra No.	Alto (polg)	Largo (polg)	Area (ancho*largo) (polg ²)	No. Vacetas	Carga (lb)	Corte (lb/polg ²)
1	0.25	1.04	0.26	1.23	377.67	3066.76
2	0.22	1.04	0.23	1.02	1281.08	5572.65
3	0.21	1.04	0.24	1.00	1413.02	5874.88
4	0.21	1.04	0.22	1.25	1585.68	4024.78
						5051.0225

ENSUEÑO DE CIZALLA TANGENCIAL

Muestra No.	Alto (polg)	Largo (polg)	Area (ancho*largo) (polg ²)	No. Vacetas	Carga (lb)	Corte (lb/polg ²)
1	0.20	0.83	0.19	5.05	7411.01	2679.87
2	0.25	0.86	0.22	2.20	1750.71	7958.59
3	0.24	0.82	0.20	2.40	2300.11	11520.48
4	0.19	0.83	0.17	2.70	2174.67	12822.48

DUREZA TANCA AXIAL

Muestra No.	No. Vacetas	Dureza (lb)
1A	2.71	2143.04
2A	1.96	1425.42
3A	2.90	1976.98
4A		
1B	2.41	1837.44
2B		
3B		
4B	1.54	1554.13
		1963.89

DUREZA TANCA LATERAL

Muestra No.	No. Vacetas	Dureza (lb)
1C	1.40	1827.90
2C		
3C	2.70	2125.11
4C	2.50	1976.98
1D	2.84	2243.86
2D		
3D		
4D	2.81	2222.12
		2065.89

Cuadro PC2. Resultados completos de los pruebas de resistencia, cizalla y dureza.

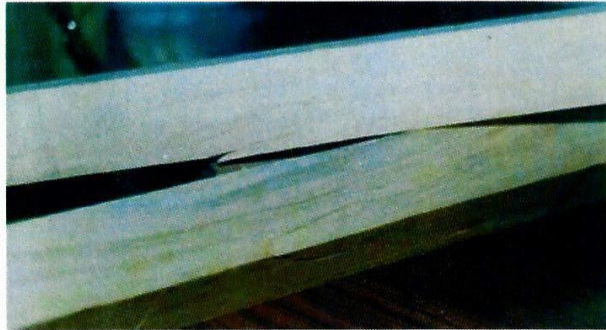


Foto PB1. Fallas causadas por ruptura



Foto PB2. Fallas causadas por compresión paralela a la fibra



Foto PB3. Fallas causadas por compresión perpendicular a la fibra

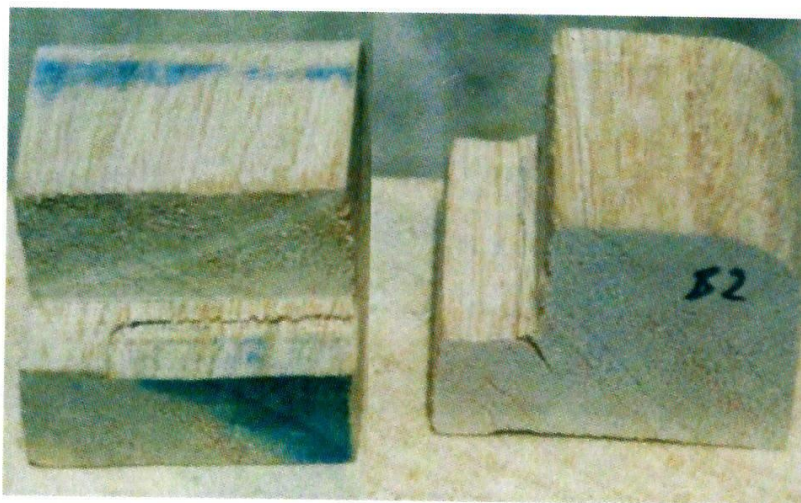


Foto PB4. Fallas causadas por el esfuerzo de cizalla, tangencial y radial respectivamente

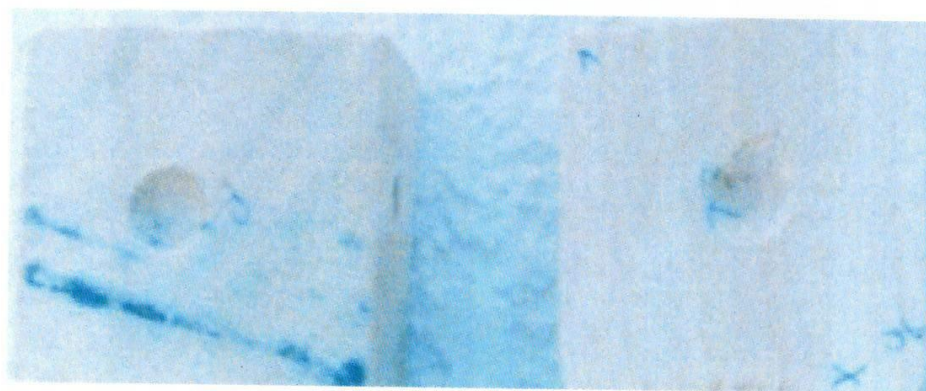


Foto PB5. Fallas causadas por la prueba de dureza Janka, axial y lateral respectivamente

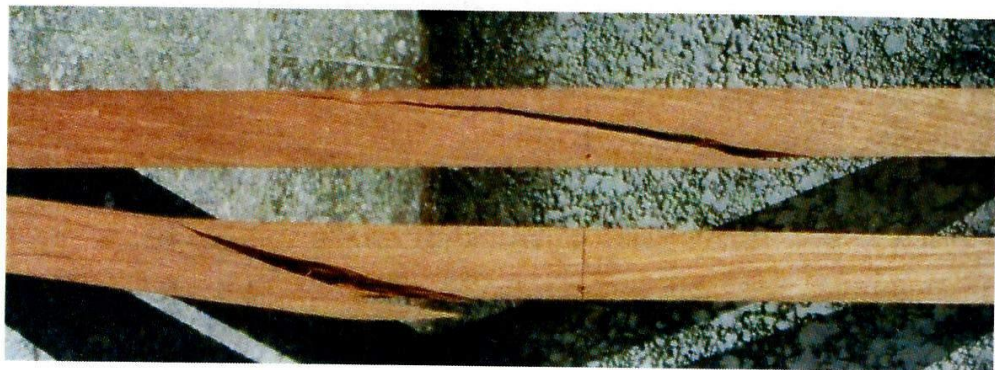


Foto MN1. Fallas causadas por ruptura

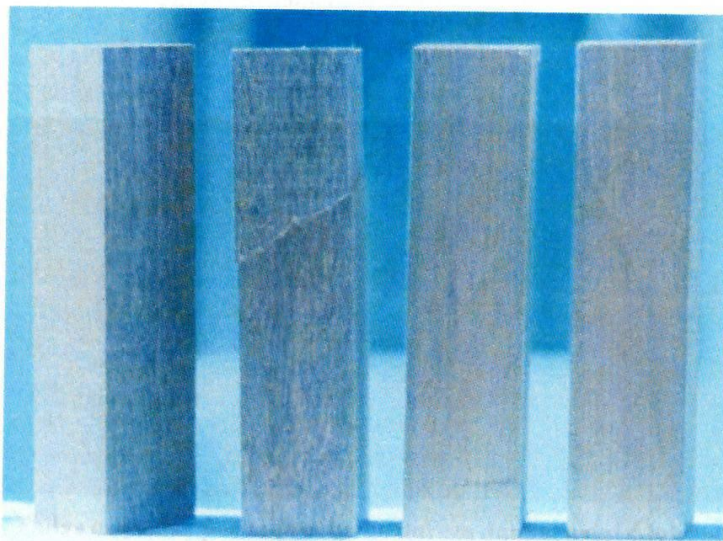


Foto MN2. Fallas causadas por compresión paralela a la fibra



Foto MN3. Fallas causadas por el esfuerzo de cizalla, radial y tangencial respectivamente



Foto MN4. Fallas causadas por la prueba de dureza Janka, axial y lateral respectivamente

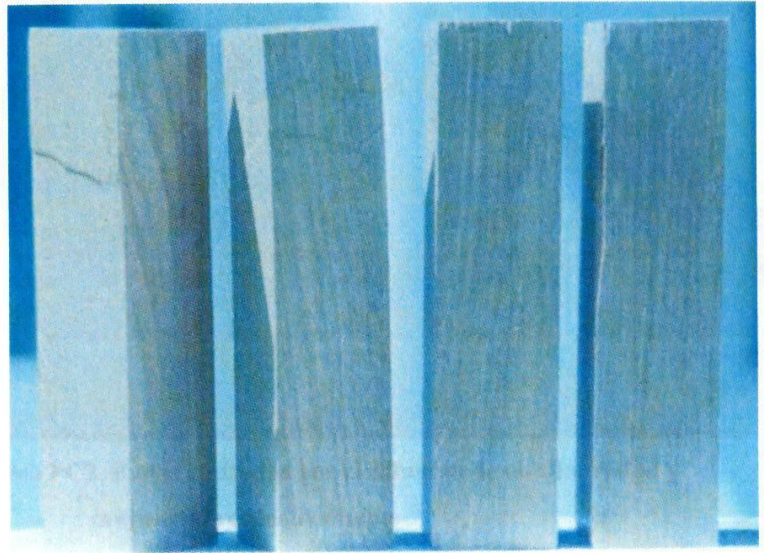


Foto PC1. Fallas causadas por compresión paralela a la fibra

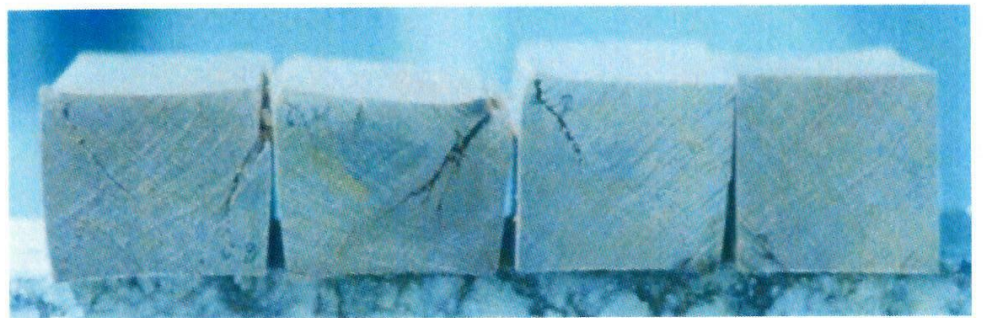


Foto PC2. Fallas causadas por compresión perpendicular a la fibra

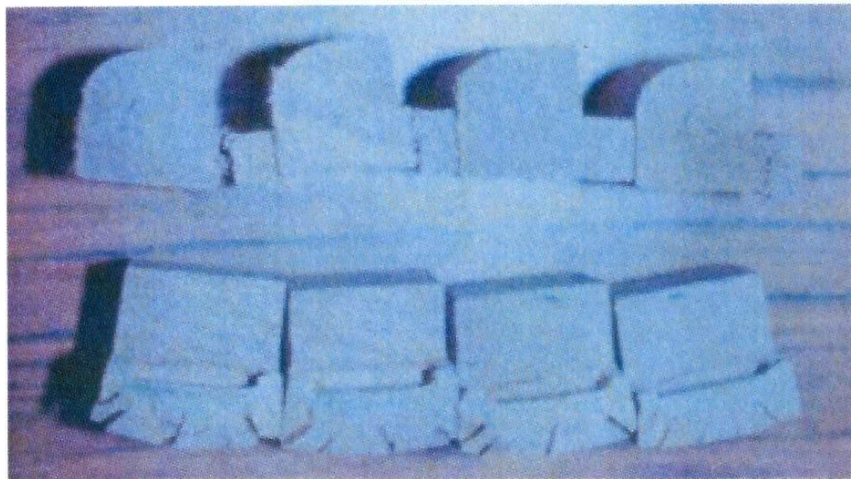


Foto PC3. Fallas causadas por el esfuerzo de cizalla, radial y tangencial respectivamente

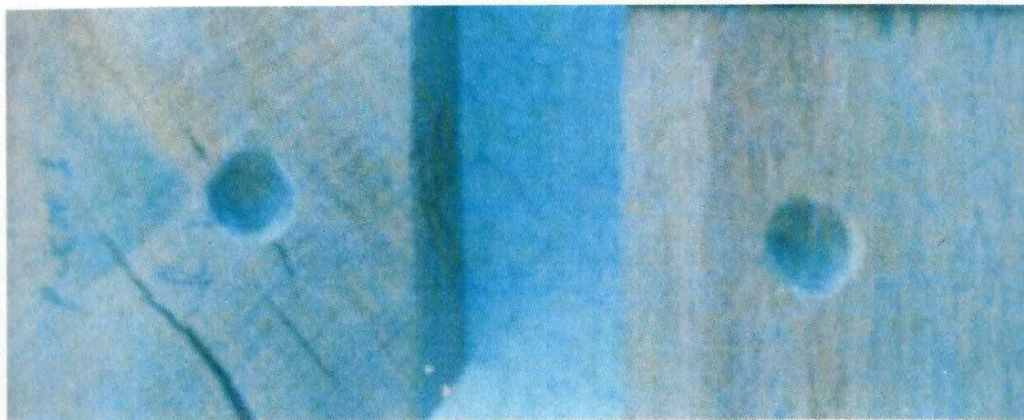


Foto PC4. Fallas causadas por la prueba de dureza Janka, axial y lateral respectivamente