

CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA KIRI PARA APLICACIONES AERONÁUTICAS

Rimoldi C. M.^a; Fernandez E.^a; Mundo M.^a

*^a Unidad de Investigación y Desarrollo Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados (U.I.D. G.E.M.A.),
Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, U.N.L.P. Calle 116 e/47 y 48 – (1900) La
Plata – Pcia. Bs. As. – Argentina*

Palabras Clave: Kiri (*Paulownia tormentosa*); estructuras aeronáuticas de madera; largueros principales; aeronaves livianas, propiedades mecánicas.

Resumen. El trabajo a presentar tuvo como objetivo determinar las propiedades mecánicas de la madera comercialmente denominada Kiri (*Paulownia tormentosa*) con el fin de evaluar su aplicabilidad en la construcción de estructuras aeronáuticas de aeronaves de pequeño porte, específicamente largueros principales.

Esta madera posee ciertas propiedades, como ser su bajo peso específico, baja cantidad de nudos y una estructura interna relativamente homogénea, que la hacen potencialmente adecuada para ser utilizada en la industria aeronáutica. Otras particularidades para resaltar son que su costo es inferior al de las maderas comúnmente utilizadas en la industria aeronáutica y que, además, se trata de un material producido en el País.

Debido a la falta de información (fundamentalmente técnica) sobre esta madera, fue necesario determinar ciertas propiedades mecánicas, físicas y cuantificar otras de las cuales no se ha encontrado información. Se generó una base de datos con el fin de realizar comparaciones de sus propiedades con las de otros materiales de aplicación aeronáutica y evaluar su potencial con el objeto de definir posibles aplicaciones. Estos estudios y análisis permitieron realizar un prediseño de un componente estructural (larguero) bajo criterios empleados en la industria aeronáutica.

En base a los resultados, satisfactorios, obtenidos de los ensayos y análisis realizados, fue posible construir y ensayar un elemento estructural (porción de un larguero alar) y validar los resultados anteriormente obtenidos.

1 INTRODUCCIÓN

A la hora de enfrentar un proyecto de diseño o construcción de una aeronave, de pequeño o gran porte, uno de los principales inconvenientes es el lograr conseguir los materiales especificados o adaptados para tal fin. Los materiales más utilizados para esta clase de aviones son las aleaciones de aluminio, los materiales compuestos y la madera.

Actualmente en el país no se producen ninguno de estos materiales específicamente para la construcción de aviones, por lo que se debe optar por reemplazarlos por materiales de producción nacional, no calificados para uso aeronáutico, o importar materiales calificados de otros países. Esta última opción agrega varios problemas logísticos que terminan aumentando considerablemente los costos.

Por ello es de interés hallar materiales que se produzcan en el país y que puedan ser utilizados para la construcción de componentes estructurales de aeronaves. Teniendo en cuenta el contexto planteado anteriormente, se evaluarán en este trabajo las características de la madera de Kiri.

Se eligió esta madera, por las características que se enumerarán a continuación que la hacen interesante para aplicaciones aeronáuticas.

Extremadamente liviana

De estructura homogénea con betas poco definidas

Baja concentración de nudos y otros defectos

Resistente a la humedad y a la intemperie

Fácil de secar

De gran estabilidad dimensional ante variaciones de humedad

Fácil de trabajar y encolar

Otras características interesantes de la madera

Disponibilidad de tablones de más de 5 m de longitud y más de 2 pulgadas de espesor

Producción nacional

De crecimiento excepcionalmente rápido

Bajo costo

Alto índice de retardabilidad de flama

Gran aislante térmico

Además de las características mencionadas, luego de realizar una serie de ensayos preliminares de resistencia mecánica, se determinó que para el bajo peso de esta madera, sus propiedades mecánicas son buenas. Sin embargo no se encuentran disponibles datos confiables de sus propiedades mecánicas, así como tampoco experiencias que haya sido utilizada en construcciones aeronáuticas. Además, actualmente esta madera se comercializa con un pobre control de calidad y sin ningún sistema de trazabilidad (lugar de origen, edad del árbol, método de secado, tiempo de estacionamiento, etc), por lo que de ser aplicada en aeronáutica, será necesario fortalecer estos aspectos.

2 METODOLOGÍA

En el laboratorio de materiales de la UID GEMA, del Departamento de Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería (UNLP), cuenta con una serie de equipos e instrumentos para realizar caracterización mecánica de diversos materiales. Uno de los equipos con los que cuenta, y que fue utilizado para la caracterización de la mayoría de las propiedades mecánicas de la madera,

es una máquina de ensayos universales marca INSTRON de 5 Tn de velocidad de deformación constante. Además del mencionado equipo, se cuenta con extensómetros mecánicos y eléctricos, amplificadores y acondicionadores de señales, strain gages, medidores de desplazamiento lineal (LVDT), estufas ventiladas, termómetros, balanza analítica, entre otros equipos.

Sobre la base de lo mencionado se realizaron ensayos de: densidad y peso aparente (madera y madera laminada), humedad, flexión (sobre madera maciza y madera laminada), compresión paralela a la veta, corte (madera y madera pegada) y de tracción. Los resultados obtenidos servirán, además, para comparar el laminado de Kiri con la madera maciza del mismo material.

Para el cálculo estructural, la madera puede ser considerada como un material ortótropo, el cual queda completamente caracterizado si se determinan 9 constantes materiales.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}, \quad \frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}$$

En la figura N°1 se presenta la convención de ejes

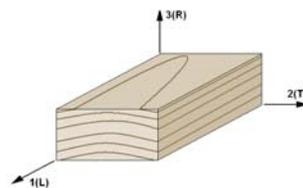


Figura N°1: convención de acuerdo a la orientación de las fibras

Sin embargo, para el prediseño de un larguero, no todas las constantes mencionadas influyen con la misma importancia. Generalmente, el módulo de elasticidad en las direcciones radial “R” y tangencial “T” es entre 10 y 20 veces menor que en la dirección longitudinal “L”. Del mismo modo, las tensiones normales de rotura en las direcciones “R” y “T”, son mucho menores a las obtenidas para el plano “L”. Estas características de la madera condicionan el diseño estructural, ya que será necesario orientar la veta para que la dirección “L” coincida con las tensiones principales. Esta consideración provoca que los valores de E_2 y E_3 tengan poca relevancia para el cálculo estructural, dado que no deberían existir tensiones importantes en dichos planos.

De la misma manera que se mencionó anteriormente, la resistencia al corte de la madera en los planos R y T, es aproximadamente ente 5 y 10 veces menor que la resistencia a los esfuerzos normales. Por lo tanto, en el diseño se buscará minimizar los esfuerzos de corte. Las constantes G_{12} , G_{13} y G_{23} , aunque no son iguales, pueden considerarse aproximadamente 16 veces menores que E_1 . Para aplicaciones en que sea necesario tomar este tipo de esfuerzos se utiliza madera terciada (laminado de madera).

Un ala tipo, de una aeronave liviana de ala alta con montantes, se encuentra sometido a un estado de carga que producirá flexión, compresión y momento torsor, figura N° 2.

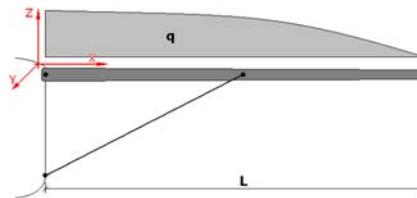


Figura N° 2: Diagrama Esquema de semiala con montante

Suponiendo que el larguero principal tomará solo los esfuerzos de flexión y compresión y que la torsión producida por las fuerzas aerodinámicas fuera tomada por otros elementos, éste se hallará sometido a cargas axiales, de corte y momento.

Un punto cualquiera del larguero, estará sometido a las siguientes tensiones

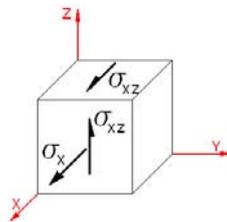


Figura N° 3

Por lo tanto se deberá alinear la dirección longitudinal de la madera con el eje X y la dirección tangencial con el eje Y.

En lenguaje tensorial, el estado de tensiones anterior puede expresarse de la siguiente manera:

$$\{\sigma_{ij}\} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_{31} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Se demuestra que no es necesario conocer el valor de ciertas constantes. A continuación se marca con “?” las constantes que no influyen en el modelo planteado.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ 0 \\ \gamma_{31} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & ? & ? & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & ? & ? & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & ? & ? & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ? & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & ? \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_{31} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Sobre este planteo se determinaron, como mínimo, los valores admisibles para las tensiones existentes.

3 PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

3.1 Selección de la madera maciza

3.1.1. Madera maciza

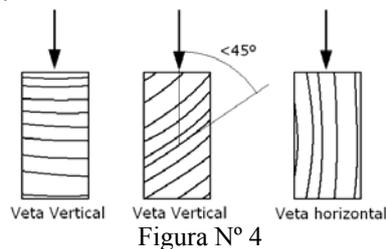
Para aplicaciones estructurales, es necesario que la madera esté libre de defectos que comprometan sus propiedades, dentro de los más comunes e importantes están las Desviaciones de las fibras (vetas) que excedan la relación 1:15 y los nudos duros mayores a 9 mm de diámetro. Algunos otros defectos no deseados son:

- 1) Nudos longitudinales, normales a los anillos anuales que atraviesen el tablón
- 2) Depósitos de resina de dimensiones mayores a 3 mm en cualquier dirección
- 3) Vetas minerales que evidencien descomposición del material

Desviaciones de la veta

En general, la veta de la madera debe estar alineada con su eje longitudinal, admitiéndose un desvío inferior a 1:15. Para largueros sólidos debe cumplirse que en los octavos exteriores del alto del larguero, desviación de la veta debe ser menor que 1:15. En los octavos adyacentes, puede desviarse hasta valores que no excedan un valor de 1:10, pero siempre de forma progresiva. En el centro del larguero puede llegar a 1:10.

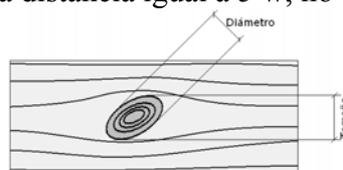
En la sección del larguero la veta debe ser vertical, se considera veta vertical, cuando su inclinación es superior a los 45°.



Distribución de nudos

En largueros sólidos los nudos ser mayor que $\frac{1}{16} w$ en el tamaño, siendo w el ancho (cuartos exteriores). Dentro de la mitad central del alto del larguero no deben ser mayor que $\frac{1}{2} w$ en el diámetro. La suma del tamaño de todos los nudos existentes sobre la cara inferior, cara exterior y los cuartos adyacentes de las caras verticales, dentro de una distancia igual a $5 w$, no debe exceder $\frac{1}{8} w$, y la suma del tamaño de los nudos dentro de un espacio igual al ancho del larguero, no debe exceder $\frac{1}{16} w$.

En la mitad central del alto del larguero, la suma de los diámetros de todos los nudos de una cara cualquiera, dentro de una distancia igual a $5 w$, no debe ser superior a $\frac{1}{2} w$.

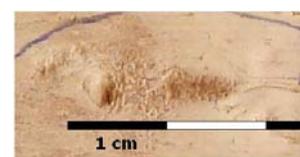
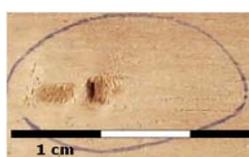
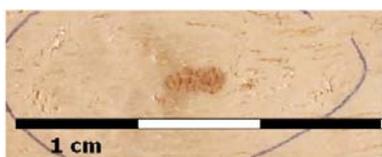


Diámetro: mínima distancia entre extremos del nudo

Tamaño: medida del nudo paralela a la dirección longitudinal del larguero.

Madera seleccionada

Se utilizaron cinco tablonces, preservados de diferente manera y provenientes de distintos proveedores. En las siguientes fotografías se muestran los nudos más comunes



3.1.2 Madera laminada

Es una práctica estándar en la construcción de largueros de ala de aeronaves utilizar madera laminada. La madera laminada permite construir componentes estructurales de gran tamaño con una calidad superior a las obtenidas para su equivalente macizo. Especialmente se destacan las siguientes ventajas:

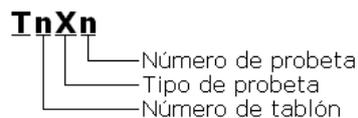
- Posibilita una mejor selección de la madera, ya que facilita la localización de defectos
- Se logran componentes con la dirección de la veta perfectamente longitudinal y ausencia de nudos, lo cual les da una calidad superior.
- Se desperdicia menos madera en el proceso de selección, especialmente para vigas de gran sección
- Permite orientar la dirección de la beta
- Permite construir piezas con curvatura y geometrías complicadas

Sin embargo, la madera laminada tiene las siguientes desventajas

- El pegamento agrega peso a la madera
- Requiere de un proceso de fabricación extra
- Si no se logra un buen pegado, deteriora sustancialmente la resistencia del producto terminado.

3.1.3 Nomenclatura de las probetas

Se adoptó la siguiente nomenclatura de probetas que permite conocer de qué tablón son originarias y el tipo de ensayo realizado.



El tipo de probeta puede ser:

- C: Probeta de compresión
- F: probeta de flexión
- H: probeta de humedad y densidad
- S: Probeta de corte
- L: Probetas de flexión de madera laminada

3.2 Ensayos realizados

3.2.1 Densidad y Peso específico aparente (maderas macizas y laminadas)

El peso específico aparente es un factor que compara la densidad de la madera con la del agua. Por lo general este factor es menor a la unidad.

$$g = \frac{m}{V}$$

$$g_e = \frac{m}{V \cdot g_{\text{agua}}}$$

g = densidad

m = masa

V = volumen

g_e = peso específico aparente

g_{agua} = densidad del agua

Existe una variabilidad considerable en la densidad de la madera de una misma especie, por lo que para comparar sus propiedades mecánicas se utiliza la siguiente fórmula empírica.

$$\frac{S}{S'} = \left(\frac{g}{g'} \right)^n$$

g = densidad de la muestra 1

g' = densidad de la muestra 2

S = propiedad de la muestra 1

S' = propiedad de la muestra 2

n = factor de corrección

PROPIEDAD	n
Flexión estática	
Tensión proporcional	1,50
Tensión de rotura	1,50
Módulo de elasticidad	1,25
Compresión paralela a la veta	
Tensión proporcional	1,25
Módulo de elasticidad	1,25

Debe tenerse en cuenta que la fórmula anterior es válida para muestras de diferente densidad pero igual porcentaje de humedad en la madera.

Se utilizaron muestras de aproximadamente 150 mm de largo y 50 mm x 50 mm de sección, estas fueron medidas con un calibre a la décima de milímetro de error obteniéndose un promedio. Posteriormente se pesaron con un error de ±0,01 gr.

3.2.2 Humedad

La madera es un material higroscópico, continuamente intercambia humedad con el ambiente en función de la humedad relativa y la temperatura del aire, esto modifica su densidad y tiene una gran influencia sobre sus propiedades mecánicas.

El ANC 18 [2] establece si la aeronave se desempeñará en un clima del tipo continental, se tomará 15% como valor estándar, mientras que si la aeronave será utilizada en un clima tropical con una humedad ambiente aproximada del 90% por largos períodos de tiempo será necesario adoptar 20% de humedad de la madera como valor estándar.

La determinación de humedad en la madera se realizó teniendo en cuenta la norma IRAM 9532, *determinación de humedad porcentual para maderas*.

Dentro de las técnicas aprobadas para la desecación de la madera se eligió el secado en estufa.

Procedimiento:

- Pesar la muestra con un error de $\pm 0,01$ gr.
- Calentar la muestra por más de 20 hs a una temperatura de $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.
- Enfriar a temperatura ambiente en un desecador.
- Pesar la muestra.
- Pesar cada 2 hs hasta tener diferencia en peso menor a $\pm 0,01$ gr.

Para calcular la humedad de la madera se utiliza la siguiente fórmula

$$H = \frac{G - G_1}{G_1} \cdot 100$$

H= Contenido porcentual de humedad

G= Peso de la madera

G₁= Peso de la madera seca

3.2.3 Flexión (maderas macizas y laminadas)

Los ensayos de flexión realizaron bajo la norma IRAM 9545, *Ensayos de flexión estática de maderas con densidad específica inferior a 0,5*.

El ensayo de flexión se realizó sobre maderas macizas y laminadas. Se utilizó la técnica de tres puntos aplicando una carga P en el centro de una viga simplemente apoyada, con una luz L.

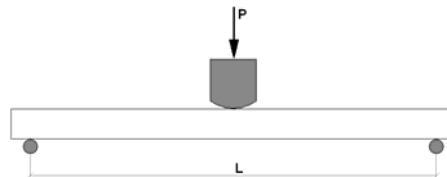


Figura N° 6

Las dimensiones de la probeta fueron las siguientes: Altura H = 50 mm, Ancho B = 50 mm,

Distancia entre apoyos L = 700 mm, Largo total D = 750 mm

Para el caso de probetas laminadas se ensayaron según dos posiciones posibles, primero hasta régimen elástico y posteriormente hasta la rotura en ambas direcciones

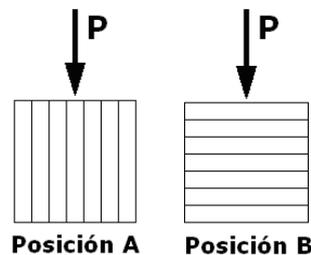


Figura N° 7

Se calculó el módulo de elasticidad a flexión (E_f), la tensión proporcional (σ_p) y la tensión de rotura (σ_r). Los ensayos se realizaron con la máquina de ensayos universal ya mencionada.

Para evitar que se produzcan aplastamientos en los apoyos de la probeta se pegó una chapa de aluminio de 5 mm de espesor en cada extremo de la misma.

La carga aplicada se midió por medio de una celda de carga de 1000 kg *Reaccion C1000*, mientras que la deformación sobre la probeta se midió por medio de un LVDT (Linear

variable differential transformer) instalado en el centro de la viga (aproximadamente en el eje neutro).



Fotografía N° 1

La velocidad de deformación utilizada fue de 3 mm/minuto, también se realizaron ensayos a una velocidad de 0,5 mm/min.

Posteriormente al ensayo se extrajeron muestras de la zona cercana a la rotura para hallar la densidad y la humedad de la madera, para una posterior corrección de las propiedades a los valores de referencia.

Se determinaron las siguientes propiedades mecánicas:

Tensión proporcional $\sigma_p = \frac{3P_p l}{2bh^2}$

P_p = Carga en el límite de elasticidad

Tensión de rotura $\sigma_r = \frac{3P_r l}{2bh^2}$

P_r = Carga de rotura

Módulo de elasticidad a flexión

$$E_f = \frac{25P_p l^3}{\Delta_p 2bh^3}$$

Δ_p = Deformación correspondiente a P_p .

Para que el ensayo sea comparable con los datos de otras maderas utilizadas en aeronáutica se utilizaron maderas con inclinación de la veta de 1:15.

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es calculado a partir de la fórmula de deflexión de una viga simplemente apoyada debido a una carga concentrada a la mitad de su longitud.

$$\Delta = \frac{Pl^3}{48EJ}$$

Al utilizar esta fórmula se están aceptando las siguientes hipótesis: El material tiene un comportamiento elástico lineal y los esfuerzos de corte son despreciables

La primera hipótesis no es absolutamente cierta para la madera, sin embargo se asume válido el módulo de elasticidad calculado para P_p (carga correspondiente a la tensión proporcional) y Δ_p (desplazamiento correspondiente a la tensión proporcional).

Con respecto a la segunda hipótesis el módulo de elasticidad calculado por medio de ensayos de flexión (E_f) no es el real, es un módulo de elasticidad “aparente” dado que en su cálculo se desprecia la contribución del corte a la deformación total. El ANC 18 [2] propone corregir este valor teniendo en cuenta que la deformación por corte es aproximadamente el 10 % del valor total con lo cual el módulo de elasticidad real será E_f multiplicado por un factor de 1,1.

3.2.4 Compresión paralela a la veta

Los ensayos se realizaron bajo la norma IRAM 9551, *Determinación de la compresión paralela al grano*.

Probeta utilizada de 25mm x 25 mm de sección y 100 mm de longitud y medida con un error máximo de 0,1 mm. Esta medida difiere de la establecida en la norma de referencia para garantizar que no se supere el límite de carga de la máquina universal de ensayo.

Para que el ensayo sea comparable con los datos de otras maderas, utilizadas en aeronáutica, la inclinación de la veta de la madera con respecto al eje longitudinal de la probeta debe ser inferior a 1:12.

La probeta se montó entre dos cabezales planos, uno de ellos dotado de una articulación esférica, para garantizar la correcta alineación de la misma.

La velocidad de desplazamiento del cabezal móvil deberá ser según la norma tomada como referencia de 0,6 mm/min pero se utilizó 0,5 mm/min que es la disponible en la máquina de ensayos. El procedimiento consistió en ir midiendo simultáneamente la carga y la deformación hasta la rotura de la probeta.

La deformación de la probeta se midió a partir del desplazamiento del cabezal de carga con un LVDT. La fuerza aplicada sobre la probeta se midió con una celda de carga de compresión de 5000 kg de carga máxima. Se adquirieron los datos de manera automática a través de una computadora.

Antes y después del ensayo se realizó una determinación de humedad, extrayendo una muestra del mismo listón de las probetas a ensayar.

En base a los datos registrados durante el ensayo es posible determinar las siguientes propiedades de la madera

$$E_c = \text{Módulo de elasticidad a compresión} \quad E_c = \frac{Pl_0}{A\Delta_l}$$
$$\Delta_l = l_0 - l$$

P = fuerza aplicada

l_0 = longitud de referencia

A = área de la sección

l = longitud instantánea a instantánea

$$\sigma_{fc} = \text{Máxima tensión proporcional} \quad \sigma_{fc} = \frac{P_{fc}}{A}$$

P_{fc} = Máxima carga para comportamiento lineal elástico

σ_{rc} = Tensión de rotura

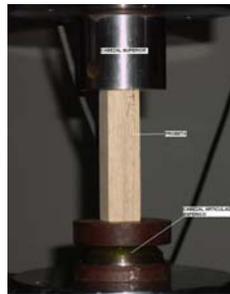
$$\sigma_{rc} = \frac{P_{max}}{A}$$

P_{rc} = Carga de rotura

El ANC 18 [2] indica que para maderas duras la máxima tensión proporcional corresponde al 75% de la tensión máxima; mientras que, para maderas blandas, la máxima tensión proporcional corresponde al 80% de la tensión máxima obtenida.

El módulo de elasticidad obtenido a través de este ensayo debería corresponderse al módulo de elasticidad real de la madera (sin influencia de las tensiones de corte), este debería ser aproximadamente un 10 % mayor que el obtenido mediante ensayos de flexión.

Dispositivo de ensayos utilizado



Fotografía N° 2

3.2.5 Corte sobre madera maciza

Se tomó como referencia la norma IRAM 9596 de *ensayo de resistencia a esfuerzos de corte para maderas*. Por no contar exactamente con el dispositivo contemplado en la norma, se procedió utilizar otro que generara condiciones de borde semejantes, adaptándose, además, las muestras.

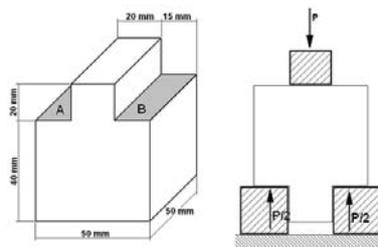


Figura N° 8

Suponiendo que la carga aplicada se distribuye en los apoyos de forma simétrica, la tensión de corte de rotura puede expresarse de la siguiente forma:

$$\tau_r = \frac{P_{max}}{2A}$$

A = área del plano de rotura por corte

P_{max} = carga de rotura registrada

La velocidad de desplazamiento del cabezal móvil fue de 0,5 mm/min y se lo midió la fuerza aplicada.

Para que el ensayo sea comparable con los datos de otras maderas utilizadas en aeronáutica la inclinación de la veta de la madera con respecto al eje longitudinal de la probeta debe ser inferior a 1:12. Se utilizó la máquina de ensayos universales mencionada en este trabajo.

Este ensayo no permite calcular el valor del módulo de corte (G), existiendo diversos métodos para medir esta propiedad, uno de ellos es el ensayo de flexión en tres puntos variando la esbeltez de las probetas. Se calcula el módulo de elasticidad a flexión y se extrapola para hallar el verdadero módulo de elasticidad. Luego es posible calcular la influencia del corte en E_f y de esta manera es posible calcular G.

3.2.6 Corte sobre madera pegada

Para los ensayos resistencia del pegado se utilizó el mismo formato de probetas que para los ensayos de corte.

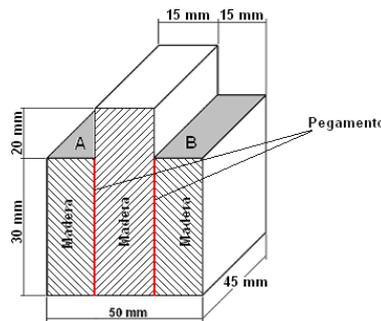


Figura N° 9

El pegamento utilizado fue *Resina Ureica* marca *Fortex*, modelo 1065, con su respectivo catalizador de prensado en frío, en la proporción indicada por el fabricante. El pegado fue realizado en condiciones limpias y a una temperatura ambiente de 25 °C, el tiempo de secado fue de seis horas. Al igual que para los ensayos de esfuerzo de corte, se halló la tensión máxima soportada en la zona de pegado

$$\tau_r = \frac{P_{\max}}{2A_p}$$

A_p = área de pegado.

Se evaluó la calidad del pegamento utilizado observando la zona de rotura.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Resultados

4.1.1 Ensayo de densidad y peso específico aparente

4.1.1.1 Madera maciza

Se extrajeron tres probetas obteniéndose los siguientes valores promedio. Debe tenerse en cuenta que la humedad de las probetas no era la misma. Se corrigieron los valores de densidad para una humedad del 12 %.

Densidad promedio [gr/ cm ³]	Densidad aparente promedio	Densidad promedio corregida [gr/ cm ³]
0,306	0,307	0,30

4.1.1.2 Madera laminada

Se determinó la densidad promedio, no fue determinada la densidad aparente ni tampoco se realizó la corrección por humedad.

Densidad promedio [gr/ cm ³]
0,315

4.1.2 Ensayo de humedad

Promediando los resultados obtenidos sobre trece muestras de cuatro tablones, se obtuvieron los siguientes valores promedio de humedad para cada uno.

Tablón	Humedad [%]
1	10
2	12
3	11
4	11

Puede apreciarse que la madera de Kiri llega a un equilibrio de humedad con el ambiente relativamente bajo, esto se aprecia especialmente en el tablón 4 el cual permaneció en un depósito interior, por siete meses, y a temperatura ambiente no controlada. Teniendo en cuenta que la ciudad de La Plata tiene un clima húmedo, esto se contradice con lo indicado por el ANC 18[2], que asume una humedad del 20 % para estas condiciones.

4.1.3 Flexión (maderas macizas y laminadas)

4.1.3.1 Maderas macizas

Curva típica de carga vs desplazamiento.

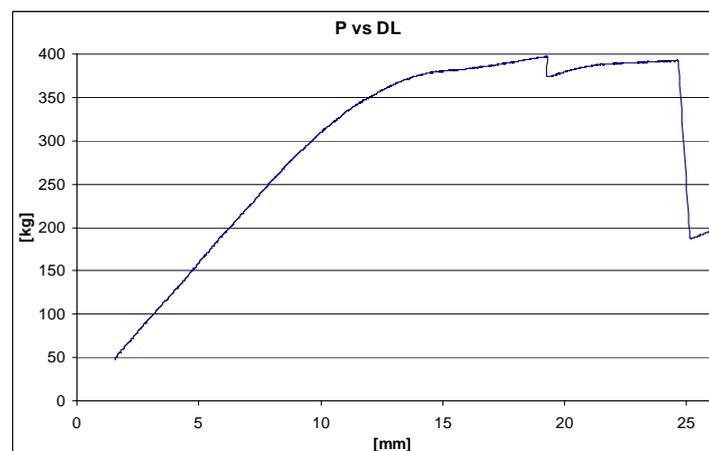


Figura N° 10

Puede observarse el comportamiento lineal de la madera en régimen elástico, seguido de una etapa de deformación permanente correspondiente al aplastamiento de las fibras comprimidas. La rotura final ocurre en las fibras sometidas a tracción, pudiendo ser total o, como en este caso en sucesivas etapas.

Probeta	Velocidad de carga [mm/min]	Humedad [%]	E_f [kg/mm ²]	σ_p [kg/mm ²]	σ_r [kg/mm ²]
T1F1	0,5	10	502	2,85	4,52
T3F1	0,5	16	487	2,60	3,9
T3F2	0,5	16	474	2,65	4,02
T3F3	3	11	610	3,20	4,49
T3F4	3	11	555	2,90	3,96
T3F5	3	11	540	3,00	4,35
T3F6	3	11	638	3,06	5,21

Como la humedad no es igual para todas las maderas, con el objetivo de comparar los resultados, se corrigieron los valores para las probetas T3F1 y T3F2 al 11% de humedad en base al procedimiento propuesto por el ANC 18 [2]. Como se desconocen las constantes de corrección para la madera de Kiri, se utilizó un valor promedio de las constantes de todas las maderas blandas tenidas en cuenta por este manual.

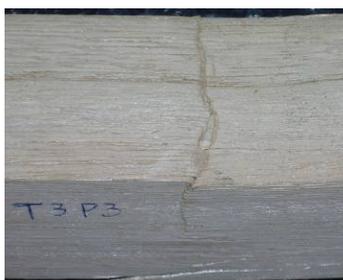
Valores corregidos

Probeta	Velocidad de carga [mm/min]	Humedad [%]	E_f [kg/mm ²]	σ_p [kg/mm ²]	σ_r [kg/mm ²]
T1F1	0,5	10	502	2,85	4,52
T3F1	0,5	16	540	3,02	4,60
T3F2	0,5	16	526	3,01	4,74
T3F3	3	11	610	3,20	4,49
T3F4	3	11	555	2,90	3,96
T3F5	3	11	540	3,00	4,35
T3F6	3	11	538	3,06	5,21

Las formas de fallas registradas fueron las siguientes

Probeta	Veta	Forma de falla o rotura
T1F1	paralela al eje longitudinal	Tracción perpendicular a la veta, no se observa colapso de las fibras comprimidas
T3F1	paralela al eje longitudinal	Colapso de fibras comprimidas en la zona de mayor esfuerzo que provocan aumento de la deformación sin aumento de la carga.
T3F2	paralela al eje longitudinal	Colapso de fibras comprimidas en la zona de mayor esfuerzo que provocan aumento de la deformación sin aumento de la carga.
T3F3	paralela al eje longitudinal	Colapso de fibras comprimidas y rotura final por tracción
T3F4	paralela al eje longitudinal	Colapso de fibras comprimidas y rotura final por tracción
T3F5	desviación de 1:20 respecto del eje longitudinal	Colapso de fibras comprimidas y rotura final por tracción
T3F6	paralela al eje longitudinal	Colapso de fibras comprimidas y rotura final por tracción

Típicas fotos de las roturas de dos muestras de un tablón



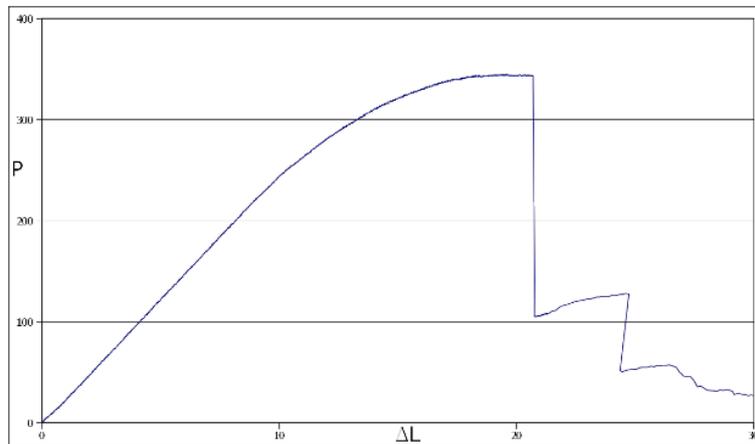
T3F3



T3F4

4.1.3.2 Madera laminada

Curva típica de carga vs desplazamiento obtenida.



Resultados de ensayos de flexión

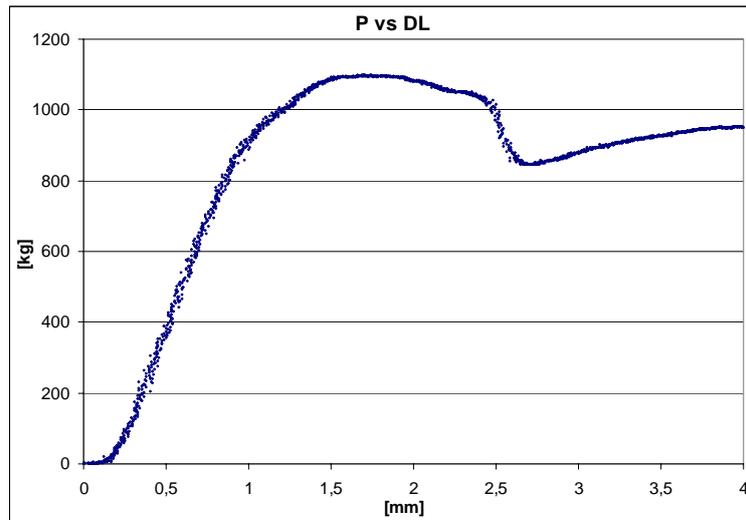
Probeta	E_f [kg/mm ²]	σ_p [kg/mm ²]	σ_r [kg/mm ²]
T3L1a	546	-	-
T3L1b	529	-	-
T3L1a rotura	553	3,02	4,27
T3L2a	558	-	-
T3L2b	551	-	-
T3L2b	543	3,02	4,39

Como observa en la imagen ambas probetas fallaron de la misma forma que las probetas macizas del tablón 3. Es casi imperceptible la división entre las distintas láminas del conjunto. No hubo falla del pegado.



4.1.4 Compresión paralela a la veta

Curva características de carga vs desplazamiento de ensayos de compresión



Debe notarse que luego de llegar a la carga máxima la probeta experimenta pandeo local en las paredes de las fibras lo cual lleva a una relajación de la carga hasta alcanzar un equilibrio entre la velocidad de desplazamiento y el aplastamiento localizado de las fibras.

De las 16 probetas ensayadas solo se muestran los resultados de las que fallaron de forma correcta.

Probeta	Humedad [%]	σ_p [kg/mm ²]	σ_{max} [kg/mm ²]
T1C1	10	2,15	2,42
T1C2	10	2,28	2,85
T1C3	10	2,29	2,68
T1C4	10	2,26	2,54
T1C5	10	2,21	2,67
T1C6	10	2,26	2,79
T3C1	11	2,19	2,40
T3C2	11	2,00	2,49
T3C3	11	1,98	2,39
T3C4	11	2,02	2,43
T3C5	11	2,00	2,55
T3C8	11	2,12	2,59

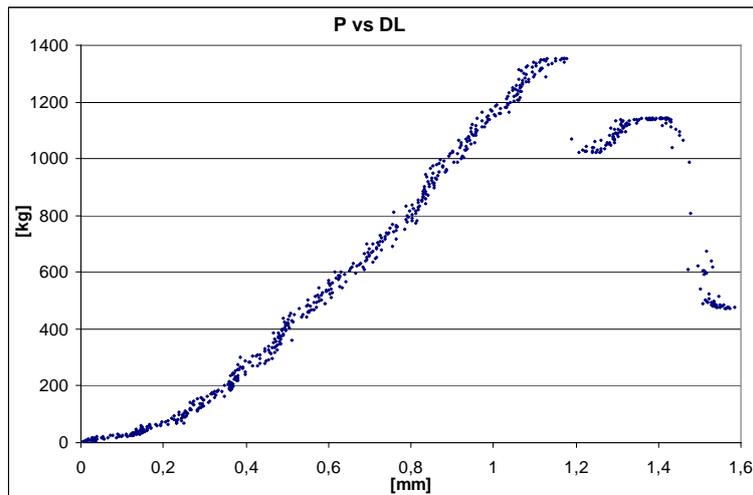
Se determinó el modulo de compresión sólo para tres muestras, para ello se utilizó un extensómetro mecánico registrándose la carga y deformación de manera manualmente para diez puntos del rango elástico obteniéndose los siguientes valores.

Probeta	E_c [kg/mm ²]
T1C6	676
T3C7	681
T3C8	684

Se verifica que el módulo de elasticidad obtenido por este método es aproximadamente un 10% mayor al obtenido para las probetas de flexión que dieron mejores resultados.

4.1.5 Corte sobre madera maciza

Curva típica de un ensayo de corte



Luego de llegar a la carga máxima ocurre la primera rotura, que en las probetas se ve como una fisura paralela a la veta de la madera; al seguir aumentando el desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayos esa fisura crece en etapas, lo que provoca un descenso de la carga de forma escalonada.

Probeta	τ_r [Kg/cm ²]
T1S1	45,5
T1S2	49,6
T1S3	43,5
T3S1	47,9
T1S4	50,4
T3S2	47,2
T3S3	49,1
T3S4	44,9

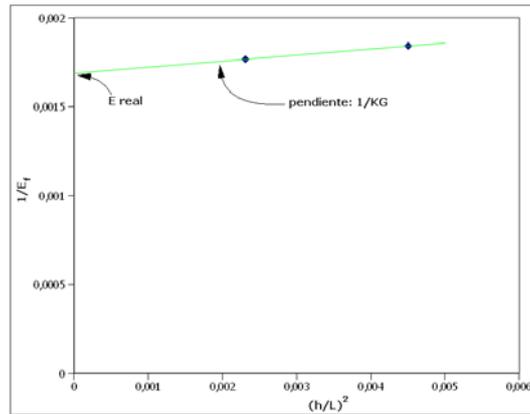
La rotura de las probetas se produjo siempre en uno de los lados, acompañada casi instantáneamente por otra rotura del otro lado.



Cálculo de G

Como se explicó se compararan los resultados de los ensayos de flexión para probetas de diferente esbeltez. E_f .

Probetas	$(h/L)^2$	$1/E_f$
1,3x1,3x27	0,002318	0,001767
4,5x4x5x70	0,004508	0,001842



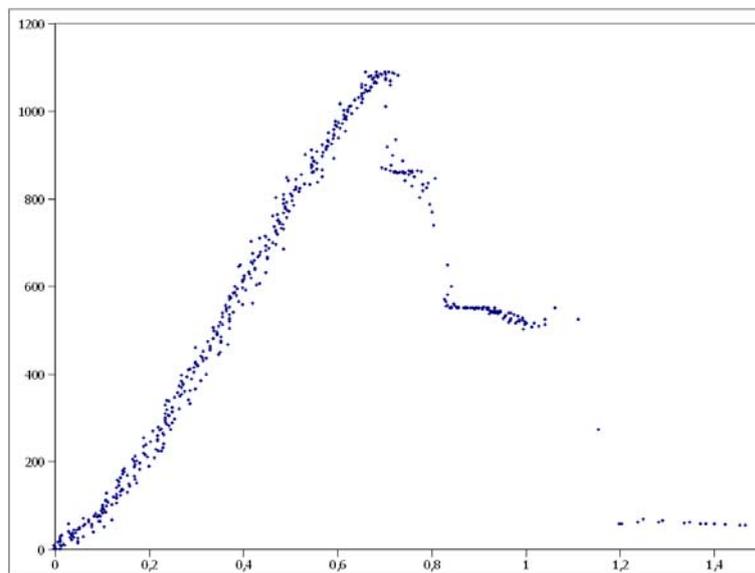
$$\frac{1}{E_f} = \frac{1}{E} + \frac{1}{KG}(hL)^2$$

$K = 5/6$ para sección rectangular

Se obtiene que $G = 35,11 \text{ kg/mm}^2$, esto equivale a una relación **E/G de 16,9**, por lo que se corrobora la aproximación teórica de una relación de 16:1 entre E y G. Este valor es, formalmente, a G_{31} sin embargo se considerará como un G promedio en las distintas direcciones, por ausencia de valores más precisos.

4.1.6 Corte sobre madera pegada

Curva característica de los ensayos de pegado.



Probeta	τ_r [Kg/cm ²]
T1B1	40,9
T1B2	45,7
T1B3	34,9
T3B1	40,8
T3B2	29,8
T3B3	39,0

Las probetas T1B3 y T3B2 no fueron prensadas luego de aplicar el pegamento, con el objetivo de evaluar la influencia del prensado.

La probeta T3B3 no se considera por haber tenido sido cargada de manera incorrecta. En todos los casos se observó que la rotura por corte se produce fuera del área de pegado con arrancamiento de la madera.



4.2 Análisis

4.2.1 Propiedades de la madera maciza

Por tener un número de muestras pequeño (menor a 30) se tomará como hipótesis que los datos arrojados cumplen con una distribución tipo T de Student.

Valor medio: $\bar{X} = \frac{X_i}{n}$, Desviación estándar: $s = \sqrt{\frac{\sum(\bar{X} - X_i)^2}{n-1}}$

Coefficiente de variación porcentual: $C_v = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100$

Ensayo	Propiedad	\bar{X}	S	Cv (%)
Densidad	ρ [gr/cm ³]	0,3	0,007	2,33
Humedad	H [%]	11,1	0,61	5,48
Flexión	E_f [kg/mm ²]	544	33,22	6,10
	σ_p [kg/mm ²]	3,01	0,11	3,84
	σ_r [kg/mm ²]	4,55	0,45	10,00
Compresión	E_c [kg/mm ²]	680	4,04	0,59
	G_{medio} [kg/mm ²]	35,1	-	-
	σ_p [kg/mm ²]	2,15	0,12	5,57
	σ_{max} [kg/mm ²]	2,57	0,15	6,00
Corte	τ_r [Kg/cm ²]	47,26	2,45	5,18
Corte madera pegada	τ_{rp} [Kg/cm ²]	42,5	2,80	6,59

Nota: se analizó por este método el caso de madera pegada por tener suficientes datos para el análisis

Todos los valores corresponden a una humedad promedio de 11%

4.2.2 Propiedades de la madera laminada

Propiedad	\bar{X}
ρ [gr/ cm ³]	0,316
E_f [kg/mm ²]	552
σ_p [kg/mm ²]	3,02
σ_r [kg/mm ²]	4,27

Madera laminada en la dirección A

Propiedad	\bar{X}
ρ [gr/ cm ³]	0,316
E_f [kg/mm ²]	541
σ_p [kg/mm ²]	3,03
σ_r [kg/mm ²]	4,39

Madera laminada en la dirección B

4.2.3 Comparación con otros materiales

Se calculó la resistencia específica dividiendo por la densidad aparente de las propiedades a comparar. Se utilizó el peso específico aparente (ρ_{aparente}).

- Hemlock con 15% de humedad, [2]

Ensayo	Propiedad	\bar{X}
Densidad	ρ_{ap}	0,45
Humedad	H [%]	15
Flexión	E_f [kg/mm ²]	1062
	σ_p [kg/mm ²]	4,36
	σ_r [kg/mm ²]	7,73
Compresión	E_c [kg/mm ²]	1168
	σ_p [kg/mm ²]	2,87
	σ_{max} [kg/mm ²]	3,87
Corte madera maciza	τ_r [Kg/cm ²]	60,56

- Spruce Stika con 15% de humedad [2]

Ensayo	Propiedad	\bar{X}
Densidad	ρ_{ap}	0,41
Humedad	H [%]	15
Flexión	E_f [kg/mm ²]	970
	σ_p [kg/mm ²]	3,73
	σ_r [kg/mm ²]	6,60
Compresión	E_c [kg/mm ²]	1067
	σ_p [kg/mm ²]	2,48
	σ_{max} [kg/mm ²]	3,30
Corte madera maciza	τ_r [Kg/cm ²]	69,60

- Fibra de vidrio uniaxial con resina poliéster, laminado por infusión, [16]

Ensayo	Propiedad	\bar{X}
Densidad	ρ_{aparente}	1,9
Tracción	E_f [kg/mm ²]	4282
	σ_f [kg/mm ²]	76,5
Compresión	σ_r [kg/mm ²]	30,6
Corte	τ_r [Kg/cm ²]	520

- Aluminio 6061 T6, fuente: [3]

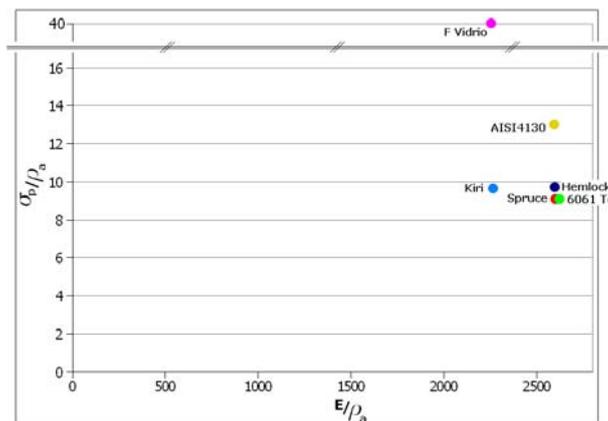
Propiedad	\bar{X}
ρ_{ap}	2,71
E [kg/mm ²]	7100
σ_p [kg/mm ²]	24,6
σ_r [kg/mm ²]	29,5
τ_r [Kg/cm ²]	2110

- AISI 4130 heat treated, fuente: [3]

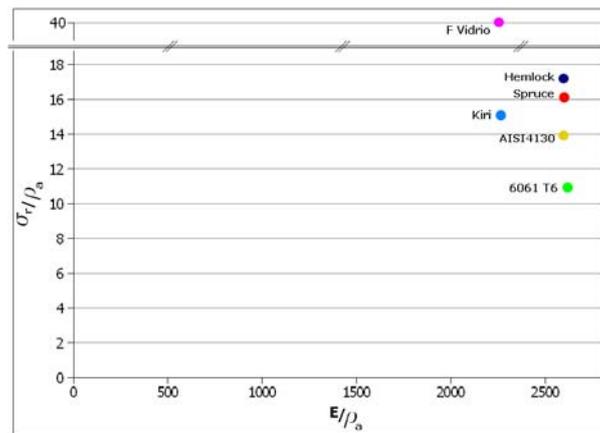
Propiedad	\bar{X}
ρ_{ap}	7,85
E [kg/mm ²]	20390
σ_p [kg/mm ²]	125
σ_r [kg/mm ²]	127
τ_r [Kg/cm ²]	74

Resistencia específica

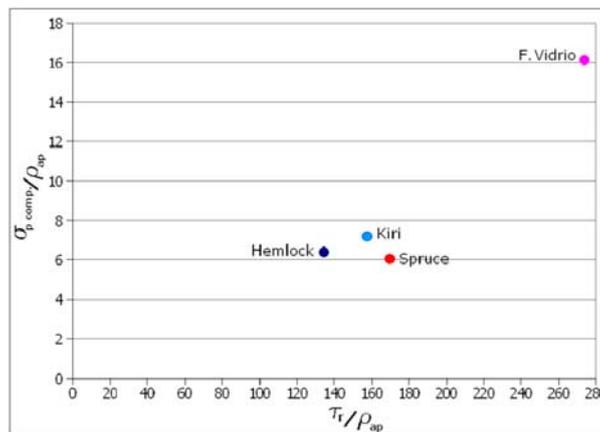
	Kiri	Hemlock	Sticka	F. Vidrio	6061T6	4130
ρ_{ap}	0,30	0,45	0,41	1,9	2,71	7,85
E_c / ρ_{ap}	2267	2596	2602	2254	2620	2590
σ_p / ρ_{ap}	9,63	9,69	9,10	40	9,08	12,99
σ_r / ρ_{ap}	15,03	17,18	16,10	40	10,89	13,89
$\sigma_p \text{ Compr} / \rho_{ap}$	7,17	6,38	6,05	16,10	-	-
τ_r / ρ_{ap}	157,53	134,58	169,76	274	778,60	942,68



El módulo de elasticidad específico de la fibra de vidrio es el menor de los materiales analizados, le sigue el Kiri casi con el mismo valor; sin embargo la resistencia específica de la fibra de vidrio es mucho mayor a la de los otros materiales estudiados. La resistencia específica del Kiri es similar a las maderas consideradas y a la aleación de aluminio 6061 T6.



Repetiendo este análisis para la tensión de rotura de los materiales se observa que el Kiri supera a los metales considerados. La superan las maderas de Hemlock y Spruce.



La fibra de vidrio con resina poliéster supera ampliamente las prestaciones de los distintos tipos de madera. La madera de Kiri supera a las otras dos en cuanto a tensión admisible a la compresión y solo al Hemlock para la resistencia a los esfuerzos de corte.

4.2.4 Comparación de la madera de Kiri laminada con la maciza.

Se calculó la diferencia porcentual con respecto a la madera maciza.

$$Diferencia_porcentual = 100 \cdot \frac{\bar{X}_{LAMINADO}}{\bar{X}_{LKIRI}} - 100$$

Propiedad	\bar{X}	D. P. [%]	Propiedad	\bar{X}	D. P. [%]
ρ [gr/ cm ³]	0,316	5,33	ρ [gr/ cm ³]	0,316	5,33
E_r [kg/mm ²]	552	1,66	E_r [kg/mm ²]	541	-0,37
σ_p [kg/mm ²]	3,02	0,33	σ_p [kg/mm ²]	3,03	0,66
σ_r [kg/mm ²]	4,27	-6,15	σ_r [kg/mm ²]	4,39	-3,52

Madera laminada en la dirección A

Madera laminada en la dirección B

4.2.5 Análisis de costos

Se comparó el costo (por unidad de volumen) de la madera de Kiri con la madera de Stika Spruce. Una sección de 9" x 1" de Spruce y 12" de largo tiene un precio de venta de aproximadamente US\$19. Asumiendo las hipótesis que se presentan a continuación, se tiene:

$$P = \sigma \cdot A$$

$$\sigma_p = 3,73$$

$$A = 1" \times 9" = 25,4mm \times 228,6mm$$

$$\Rightarrow P = 21658kg$$

Para soportar la carga de 21658 kg con madera de Kiri, se necesita una sección de 11,6" x 1".

El precio de la madera de Kiri, por pie de longitud, para una sección de 1" x 11,6" es de \$ 14,5 o US\$ 3,81. Se concluye que a igual resistencia la madera de Kiri ésta es 5 veces más barata que la Spruce.

Nota: No se tuvo en cuenta el costo de transporte, el precio de la madera de Spruce corresponde a madera certificada para uso aeronáutico mientras que la madera de Kiri no, se supuso un cambio monetario de US\$ 1 = \$3,80.

4.2.6 Conclusiones

Madera maciza

Fue posible obtener valores útiles de todas las propiedades necesarias para el prediseño de un larguero.

Se comprobó que una correcta selección de la madera puede mejorar sustancialmente su rendimiento; si bien esta selección no fue estricta como si el material fuera a ser utilizado para construir un componente aeronáutico, es esperable que los valores hallados puedan ser superados. Los resultados obtenidos son conservativos.

Se comprobó que la humedad que alcanza la madera de Kiri en condiciones similares a las de un hangar, con ambiente húmedo como el de la ciudad de La Plata, está muy por debajo de lo que se indica en el ANC 18 [2] para los cálculos estructurales. Esto es favorable ya que permitiría incrementar los valores de resistencia.

La densidad de la madera de Kiri difiere de los resultados obtenidos por diferentes fuentes, nacionales y extranjeras. En general se encuentran valores de densidad de entre 240 y 320 kg/mm³, esto puede deberse al ambiente y el clima en cual se desarrolló el árbol. Quedará pendiente realizar un análisis del valor de densidad más conveniente a ser utilizado en estructuras ya que esto modificará fuertemente las propiedades mecánicas.

Los valores de resistencia a la tracción admisible obtenidos demuestran que la madera de Kiri, a igual peso, tiene las mismas prestaciones que las maderas aeronáuticas utilizadas, sin embargo su módulo de elasticidad, en comparación por peso, es un 20% menor al de ellas.

La resistencia a la compresión obtenida para madera de Kiri resulta superior (en valores específicos) a las otras maderas. El módulo de elasticidad real obtenido es superior al módulo de elasticidad a flexión promedio, esto podría deberse a que los datos de deformación se obtuvieron con un instrumento mecánico, otro factor de influencia es que se ensayaron pocas probetas, los valores obtenidos pueden no ser representativos.

Los ensayos de corte resultaron satisfactorios esto se aprecia en la baja dispersión obtenida en los resultados.

La resistencia del pegamento resultó muy buena, obteniéndose una resistencia al corte un 5% menor a la obtenida por la madera continua. Deberá estudiarse con más profundidad un procedimiento de pegado más eficiente, principalmente con el objetivo de lograr una impregnación más profunda en la madera.

Madera laminada

El módulo de elasticidad obtenido en la dirección “A” fue, para ambas probetas, mayor al obtenido en la dirección “B”. Como se estudió anteriormente esto puede deberse a la influencia del pegamento que, en los ensayos en la dirección “B”, puede no impedir completamente la deformación relativa entre láminas comprometiendo la hipótesis de las secciones planas. La máxima diferencia obtenida es menor al 6%, hallada en la probeta T3L1.

La tensión proporcional de la madera laminada resultó ser igual a la obtenida para la madera maciza.

Las tensiones de rotura obtenidas fueron menores a las obtenidas para la madera maciza, esto puede deberse al orificio del tornillo de sujeción del dispositivo de medición de deformaciones, de todas formas, al igual que para la tensión proporcional, los datos no son suficientes para formular una conclusión.

Por lo tanto, debido al cambio insignificante en las propiedades mecánicas y al pequeño aumento del peso, y teniendo en cuenta las ventajas enumeradas del laminado, se concluye que la madera laminada es preferible para la construcción de estructuras de aeronaves.

4.2.7 Conclusiones finales y trabajos futuros

En base a los resultados obtenidos se concluye que es posible utilizar la madera de Kiri como material de construcción para largueros de ala. Se deberá tener en cuenta que, comparado con las maderas utilizadas en esta aplicación, un larguero de Kiri ocupará un mayor volumen, esto puede comprometer su aplicación en alas delgadas o con poco espacio para la estructura.

Como trabajos futuros será necesario estudiar la resistencia a la fatiga de las uniones pegadas y la instrumentación de sensores de deformaciones (strain gages) con el objeto de determinar su factible aplicación y la obtención de otras características mecánicas sobre todo de laminados.

Para los casos en los que existan cargas concentradas, por ejemplo cuando se colocan en la madera pernos, tornillos o algún otro método de sujeción se deberá realizar un estudio particular de resistencia y vida útil.

También será conveniente estudiar la posibilidad de reforzar la madera laminada con algún material, con el objetivo de aumentar su resistencia y especialmente el módulo de elasticidad.

REFERENCIAS

Libros y manuales

-1 AC 43.13 1b, año 1998

-2 ANC 18, Design of Wood aircraft structure, año 1951

- 3 Analysis and Design Of Flight Vehicles – Bruhn
- 4 Carpintería de maderas- UNLP, FI, Cátedra de construcción de edificios
- 5 Fichas técnicas de maderas- Instituto Nacional Forestal
- 7 Manual para el secado artificial de maderas misioneras- Consejo Federal de Inversiones
- 8 Wood Handbook

Normas

- IRAM 9514, Acondicionamiento de maderas para ensayos
- IRAM 9523, Selección y colección de muestras de madera
- IRAM 9532, Determinación de la humedad de la madera
- IRAM 9545, Ensayo de flexión estática de maderas con peso específico aparente menor a 0,5
- IRAM 9544, Determinación de la densidad aparente de la madera
- IRAM 9551, Determinación de la compresión axial o paralela al grano
- IRAM 9596, Determinación de la resistencia a esfuerzos de corte paralelos a la fibra

Publicaciones y papers

- 9 Estudio de las propiedades física - mecánicas y comportamiento en procesos industriales de la madera de Kiri, Grevillea, Paraíso y Toona- UNAM, Ing O. Pereyra
- 10 Rayionallity of Kiri Word (Paulownia tormentosa) in Tradicional Uses – Kazuya Minato and Haruka Sugawara
- 11 The research study of the physical and mechanical propieties of Chinese Kiri woods – Akira Takahashi, Yuku Dong, Chunrui Zhao
- 12 Preliminary study on Word propietis of Paulownia species grown in Peshawar – Pakistan Forest Institute
- 13 Comparison of Shear Modulus Test MethodS - Kate Harrison
- 14 Determining the Shear Modulus of Sitka Spruce from Torsion Tests - Aamir KHOKHAR, PhD Student, Centre for Timber Engineering, Napier University, Edinburgh, UK
- 15 Resultados de ensayos obtenidos por el Ing Gastón Bonet, UNLP, FI para un panel de compresión de fibra de vidrio con resina poliéster