

# ANALISIS DE FALLA DE UNA HELICE CONSTRUIDA EN MADERA

Daniel A. Aquino<sup>1,3\*</sup>, Nelson Alvarez Villar<sup>1,3</sup>, Francisco Aguera<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Sistemas Guiados y Simulación, CITEDEF,  
Villa Martelli, Pcia. de Bs. As. Argentina.*

<sup>2</sup>*Departamento de de Ensayos y Evaluaciones CITEDEF  
Villa Martelli, Pcia. de Bs. As. Argentina.*

<sup>3</sup>*Universidad de la Marina Mercante (UdeMM-DICyT). Ciudad Autónoma de Bs. As. Argentina*

<sup>4</sup>*Universidad Tecnológica Nacional-FRBA, Ciudad Autónoma de Bs. As. Argentina*

**Palabras clave: Análisis de falla, hélice, defectos.**

## **RESUMEN:**

En el presente trabajo se presenta el análisis de falla realizado en una hélice de madera rota en vuelo mientras propulsaba una aeronave PA-12 que pudo regresar a tierra sin mayores pérdidas.

Para el estudio se contó con dos partes de la hélice; el sector central, y uno de los fragmentos desprendidos que pudo ser recuperado.

Se analizan los requerimientos reglamentarios de este tipo de dispositivo en la bibliografía de referencia, se realizan exámenes ópticos en los fragmentos y se estudian sus características constructivas.

Se concluye que la misma adolece de defectos constructivos y de calidad que motivaron su falla en vuelo y se proporcionan recomendaciones al fabricante.

---

\* Daniel A. Aquino: [daquino@citefa.go.ar](mailto:daquino@citefa.go.ar), Departamento de Sistemas Guiados y Simulación, CITEDEF, Juan Bautista de La Salle 4397 (1603), Villa Martelli, Pcia. de Bs. As. Argentina. Tel.: 0054 011 4709 8100 int. 1297

## 1 INTRODUCCION

La utilización de la Madera como elemento estructural esta vinculado con el inicio de la industria aeronáutica, siendo muy generalizado hasta finales de la segunda guerra mundial cuando el incremento de las performances de los aviones hizo que se llegara al límite tecnológico de su capacidad portante. La bibliografía existente respecto a su correcto uso es de la década del cuarenta pero es clara y abundante en información ya que podía encontrarse presente en revestimiento, largueros, costillas, y hélices.

Con propósitos mecánicos podemos considerar la madera constituida de fibras de celulosa firmemente soldadas. La forma, medida y arreglo de estas fibras junto con su composición química gobiernan su resistencia.

Su crecimiento difiere con la estación del año, en primavera sus paredes son más finas mientras durante el invierno son más gruesas, esto determina su característica más visible en un corte transversal que son los anillos anuales. Si el corte se realiza en forma longitudinal y tangente a los anillos, veremos otra característica distintiva que es la veta de la madera.

Sus propiedades varían entre árboles de la misma especie y partes del mismo árbol dependiendo de las condiciones prevalecientes durante su crecimiento. Se trata de un material altamente anisotrópico e higroscópico, una vez cortado el tronco contrae con la pérdida de humedad, pero la contracción no es uniforme, existen direcciones privilegiadas, de allí la predilección por algunos tipos de corte para su uso estructural.

La mayoría de las sustancias expanden en distinta medida cuando son calentados, en el caso de la madera su expansión térmica es tan pequeña que no es relevante su consideración en el uso cotidiano ([ANC-18, 1951](#)).

A los fines de obtener resistencia adecuada en cualquier dirección se utilizan laminados de varias tablas o chapas combinando las direcciones de las vetas, de esta forma se pueden construir partes fuertemente exigidas como largueros y hélices. Para asegurar su comportamiento resistente deben seguirse reglas en cuanto a selección del material y conformado de los laminados.

## 2 REQUERIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

### 2.1 Tipos de cortes

El corte de los tablones en el tronco se clasifica de acuerdo a la orientación con respecto a los anillos anuales. Si la dirección es tangente a la fibra, los mismos serán cortes de veta tangente, y si son en la dirección radial corte de veta radial. Por definición los tablones de corte tangente serán aquellos en que el anillo anual forma un ángulo de  $45^\circ$  o más con respecto al espesor. Por el contrario, aquellos en que el ángulo sea menor a  $45^\circ$  serán de veta radial.

En la fabricación de hélices de madera, se utilizan dos tipos distintos de conformación de laminados, en tablas de  $3/8$  (9,525 mm) a una pulgada de espesor o en chapas de  $1/32$  (0,794 mm) a  $1/6$  (4,06 mm) de pulgadas. El primer tipo se utiliza en hélices de paso fijo, y el segundo en hélices de paso variable.

Con el objeto de conservar la estabilidad dimensional y de forma, y debido a que la contracción de los tablones depende de la dirección de corte, se recomienda utilizar un solo tipo de corte y del mismo tipo de madera en el armado del conjunto para hélices, tratando, en el caso de utilizar corte de veta tangente, de ordenarlos de tal forma que los anillos anuales queden en dirección opuesta ([ANC-19, 1951](#)).

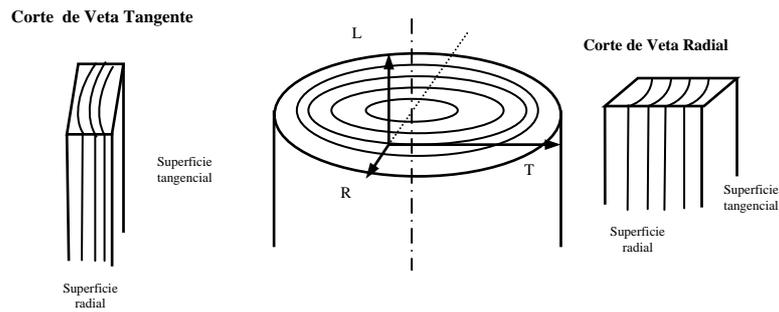


Figura 1: Tipos de corte de madera

## 2.2 Orientación de las fibras

La pendiente de las fibras con respecto al eje longitudinal de los laminados debe ser máximo 1/15, es decir de 0.06 y debe tenerse especial cuidado que en los 2/3 exteriores de la pala las vetas sean casi rectas. La medición se realiza sobre la superficie radial (ANC-19, 1951; AC-43-13-1b, 1998).

## 2.3 Presencia de nudos

Los nudos son heterogeneidades de la madera. Surgen a partir del crecimiento de las ramas. Sus fibras se entrelazan con las fibras del tronco, distorsionando la dirección de las vetas. También pueden deberse a brotes que no llegaron a desarrollar y durante el crecimiento del árbol las fibras lo rodean cambiando su orientación. Cuando la rama cae o muere las fibras ya no se entrelazan y siguen creciendo alrededor de él, y con la aparición de los sucesivos anillos anuales se van cubriendo el nudo y perdiendo la distorsión. Esto forma un nudo encapsulado que puede estar bien encajado o no. Al perder humedad después del corte, puede perderse o mantenerse firme en su posición. Los únicos nudos permitidos son los sanos encajados firmemente en su lugar, sin muestras de putrefacción y tan duro como la madera en derredor.

A los fines de tener un criterio dimensional de aceptación, se define el tamaño como la distancia entre las líneas que encierran el nudo y paralelas a los bordes de la cara en la cual el nudo aparece y diámetro como la distancia mínima entre las líneas paralelas que encierran el nudo (ANC-19, 1951).

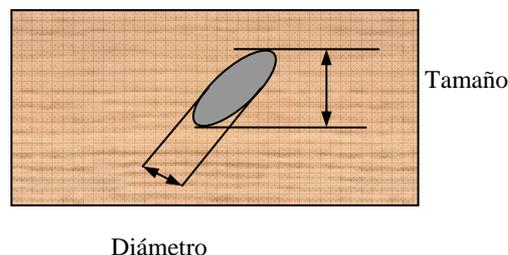


Figura 2: Forma de medir un nudo

La normativa regulatoria de la FAA (Federal Aviation Administration) establece que solo serán aceptables los nudos de hasta 3/8" de diámetro bajo las siguientes condiciones (9,52 mm): que no se encuentren en los bordes de vigas, que no produzcan grandes divergencias en la fibra, que no se encuentren en el tercio central de una viga, y a no menos de 20" (508 mm) de la presencia de otro nudo o defecto de tamaño similar. En general, maderas con presencia

de con nudos con diámetros mayores a ¼” (6,35 mm) deben usarse con precaución (ANC-19, 1951).

### 3 OBSERVACIONES REALIZADAS

#### 3.1 Características constructivas

La hélice a analizar se encontraba montada en una aeronave Piper PA-12, y sufrió la rotura en vuelo con un régimen de funcionamiento del motor de aproximadamente 1900 RPM. Se recibieron dos partes de la hélice, la parte central y el fragmento fracturado, las cuales se pueden ver en la Figura 3 y la Figura 4, con sus dimensiones. Estos fueron los únicos restos encontrados. La hélice carece de historial, ya que fueron perdidas por el propietario.

Designamos a los fines de su identificación pieza A la parte central y pieza B al fragmento desprendido. La pieza B pertenece a la Pala 1, el otro extremo pertenece a la pala 2.

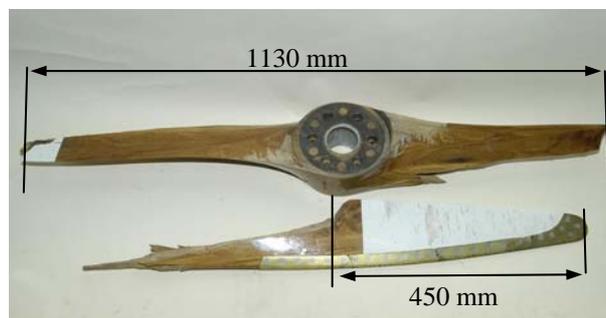


Figura 3: Vista de Intradós

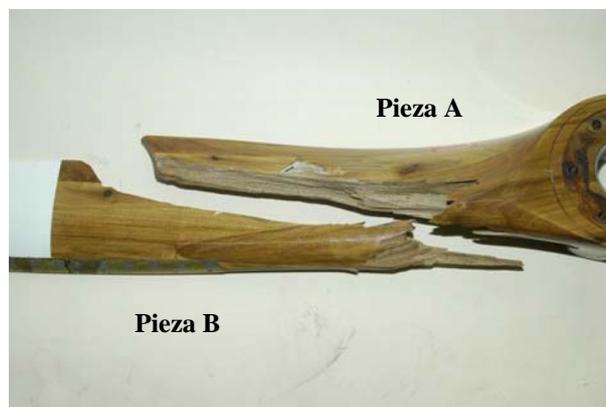


Figura 4 : Vista de Extradós

El conjunto fue construido laminando cinco elementos de madera de Peteriby de espesor similar. Esta madera presenta estadísticamente una relación de 29 a 1 en su valor de resistencia a la tracción, aplicada en la dirección radial y axial (Comodoro Juan I. San Martín, 1946).

Para individualizar las distintas laminas numeramos de menor a mayor desde el intradós hacia el extradós. Las láminas han sido obtenidas de cortes en la dirección radial y tangencial del tronco. Las láminas 1,2 y 5, corresponden a veta tangente, y las laminas 3 y 4 a veta radial. Los podemos identificar en el corte transversal del cubo de la Figura 5 y diagrama de la Figura 6.

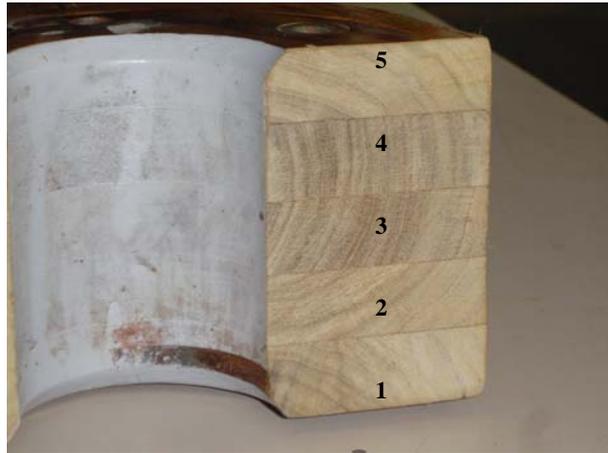


Figura 5: Corte transversal del cubo

La longitud de punta a punta era originalmente de 1930 mm y solo las láminas 2, 3, y 4 constructivamente se extienden hasta los extremos.

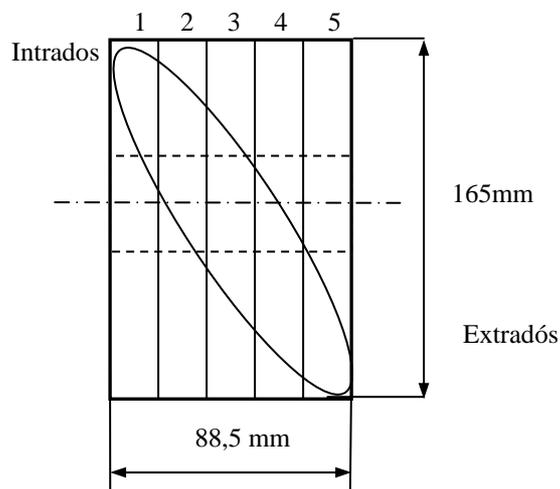


Figura 6: Esquema, vista de perfil, de la construcción de la hélice.

Nº Lámina	Espesor (mm)	Tipo de corte
1	18	Veta tangente
2	18	Veta tangente
3	17,5	Veta radial
4	18,5	Veta radial
5	16,5	Veta tangente
<b>Total</b>		88,5

Tabla 1: Características del laminado

### 3.2 Estudio de la fractura

El extremo de la pala 2 muestra una fractura con astillamiento (ver [Figura 7](#)). La fractura de la pala 1 es limpia (ver [Figura 8](#)) y si superponemos las piezas A y B se ve gran coincidencia entre ambas, transcurriendo mayormente a lo largo de las fibras (ver [Figura 9](#)).

Se puede ver una superficie más brillante que el resto en la [Figura 8; 10 y 11](#), pertenecientes a la lámina 2 y 3, indicando que la fractura se produjo a través de la superficie radial de la madera.



Figura 7: Extremo roto de la pala 2



Figura 8: Extremo roto de la pala 1



Figura 9: Vista de la fractura en la pala 1 desde el intrados



Figura 10: Extremo de la pala 1, piezas A y B.

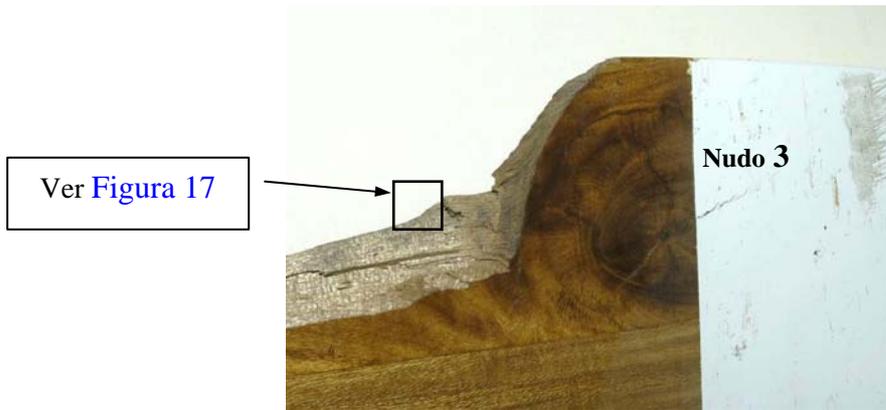


Figura 11: Pieza B, nudo y detalle de fractografía.

### 3.3 Presencia de nudos

Se contabilizaron, observaron y midieron los nudos presentes, siguiendo el criterio mencionado en el punto 2.3. En la [Tabla 2](#) se clasifican los nudos que se muestran en las Figuras 10, 11 y 12.

Nº	Nº de Lamina	Tamaño (mm)	Diámetro (mm)	Ub. Gral.	Obs.
1	3	9	6	Pala 1 Pieza B	Extradós
2	3	8	6	Pala 1 Pieza A	Extradós
3	2	38	26	Pala1 Pieza A	Intrados
4	2	10	5	Pala 1 Pieza A	Intrados
5	4	9	15	Pala 2	Extradós
6	3	14	14	Pala 2	Extradós

Tabla 2: Posición de los nudos encontrados



Figura 12: Nudo 4

El nudo 4, en realidad es un hueco, ya que el brote o rama que lo origino se ha caído, dejando el orificio y una leve distorsión.

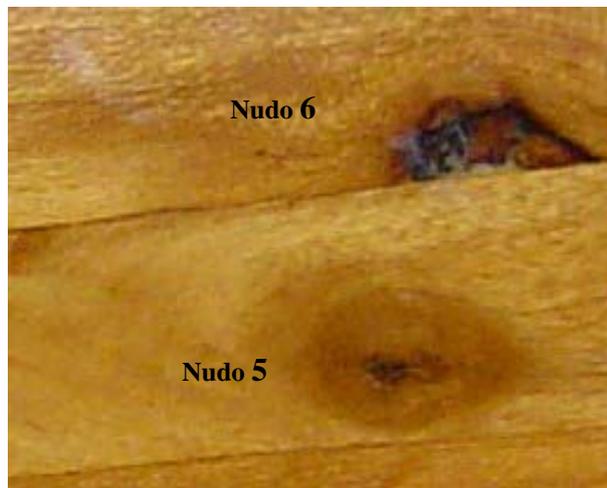
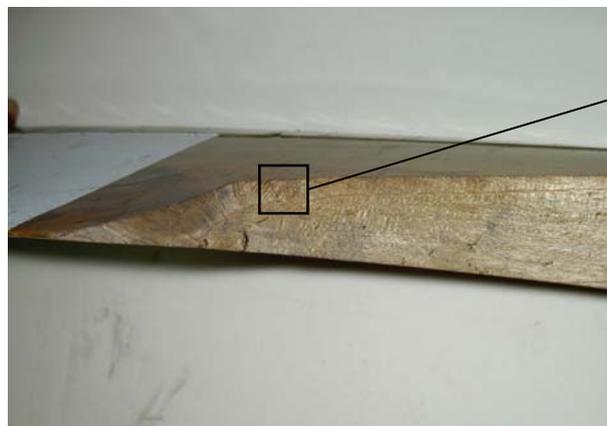


Figura 13: Nudos 5 y 6 en la Pala 2

Las fibras en la superficie de fractura que rodea al nudo 3 tienen orientación casi perpendicular al eje principal de la pala, lo que es visible en las piezas A y B (Figuras 14 y 15). Esto expone la superficie radial de la madera en la dirección axial de la pala.



Ver [Figura 16](#)

Figura 14: Pieza B y detalle de fractografías



Figura 15: Detalle de la dirección de las fibras en la superficie de fractura de la pala 1

La superficie de fractura de la lamina 1 y 2 corresponde a la superficie radial de los cortes de la madera, visibles en la Figuras 16 y 17.



Figura 16: Lupa Leica 50 x .Superficie de fractura. Lamina 2

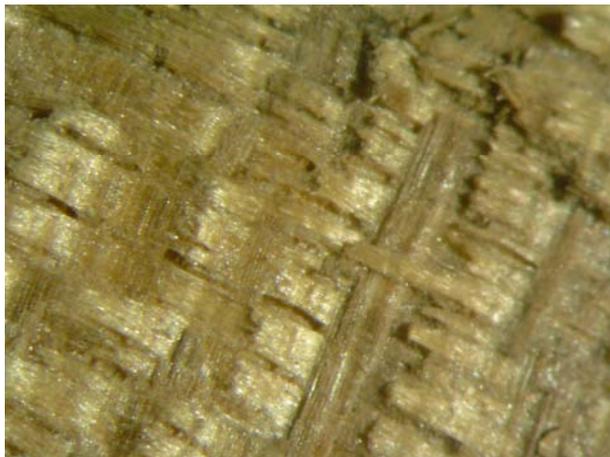


Fig.17: Lupa Leica 50x. Superficie de fractura detrás del nudo 1. Lamina 3.

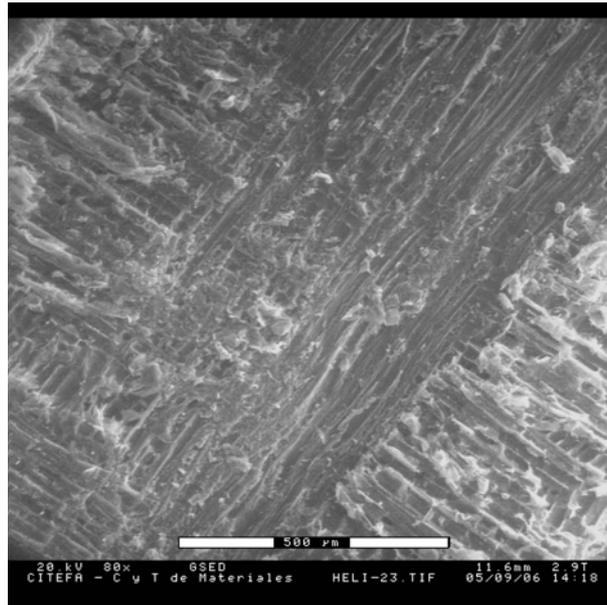


Fig.18: 80 x. Detalle microscópico de la superficie radial de la madera

### 3.4 Pendiente en los cortes

Teniendo en cuenta que las láminas 3 y 4 son de corte de veta radial, medimos la pendiente de la fibra con respecto al eje longitudinal, en la superficie expuesta, que resulta ser la superficie radial. Los valores de pendiente en estas láminas se pueden ver en la tabla 3.

Pala	Lamina	Pendiente
1	3	0,28
	4	0,265
2	3	0,15
	3	0,15

Tabla 3: Pendiente de las láminas

## 4. ANALISIS DE RESULTADOS

En la pala 1 la distorsión producida por el nudo N° 3, abarca toda la parte visible de la lamina N° 2 en el intrados. Este nudo se encuentra situado en una sección de poco espesor, como es el borde de fuga y su tamaño supera los límites recomendados.

Las dimensiones de los nudos 1 y 2, se encuentran dentro los limites recomendados, aunque la distancia entre ambos es muy pequeña, y el nudo 1 esta ubicado en la parte posterior del nudo 3.

En la lámina 3 los valores de pendiente de la veta son superados, y en la lámina 4, si bien se encuentra que la orientación de las fibras está en la medida recomendada, en la línea de fractura sigue una pendiente mayor.

La orientación de la fibra en las láminas 3 y 4 en la pala 2 tiene la misma pendiente en el extremo de la pala y la fractura sigue su orientación.

La distorsión que adquiere la fibra alrededor del nudo N° 3, le quita resistencia frente a esfuerzos estáticos como tracción y flexión y es mucho mas grave si se dan esfuerzos dinámicos como choque o cargas cíclicas, que puedan iniciar un proceso de fractura en su

contorno. Esta situación se ve favorecida por la distorsión producida por los nudos 1 y 2 en el laminado 3 y la orientación de las fibras del laminado 4.

## **5. CONCLUSIONES**

La hélice adolece de defectos de construcción, se utilizaron cortes de distinta orientación de veta y en el armado no se dispusieron las láminas de forma de asegurar una pendiente de las fibras alineadas en la dirección axial.

Las maderas utilizadas se destacan por la presencia de nudos en las tablas que componen el conjunto.

No se detectaron desprendimientos entre láminas, lo que evidencia una buena calidad del cemento adhesivo y la técnica de prensado.

El nudo N° 3 es el lugar más probable de inicio de la falla, dadas sus dimensiones y la cercanía al borde de fuga. Posteriormente la fractura se continúa en forma longitudinal al eje de la pala 1.

El desprendimiento de B se produjo por esfuerzos actuantes en el plano de giro de la hélice, siguiendo las superficies de menor resistencia que son los planos de superficie radial de las láminas 2 y 3 y la línea de las fibras de las láminas 3 y 4.

Por la forma que se encuentran desprendidas las laminas 2; 3 y 4 en la pala 2, deducimos que ha sufrido una carga en dirección perpendicular al plano de rotación y en el sentido de intrados a extradós.

La presencia del nudo N° 1 detrás del nudo N° 3, aunque en diferente lamina, contribuye a facilitar la fractura de la sección.

La fractura longitudinal y astillamiento presentes en la pala 2 han sido producidos por un impacto frontal en su extremo de origen indeterminado.

## **REFERENCIAS**

ANC-18, Design of Wood Aircraft Structures, Capítulo I. Munitions Board, Aircraft Committee, 1951.

ANC-19, Wood Aircraft Inspection and Fabrication, Capítulos II y V. Munitions Board, Aircraft Committee, 1951.

AC-43-13-1b, Acceptable Methods, Techniques, and Practices-Aircraft Inspection and Repair, Capítulo I. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 1998.

Comodoro Juan I. San Martín, Estudio y Ensayos Sobre Maderas Argentinas. Ex Instituto Aerotécnico, 1946.