



## PROCEDIMIENTO PRÁCTICO PARA LA DETERMINACION DE CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE PALAS DE HELICÓPTEROS FABRICADAS DE MATERIALES COMPUESTOS

C. Rimoldi<sup>a</sup>, A. Chuguransky<sup>b</sup>

<sup>a</sup>C.T.A. Dpto. de Aeronáutica., Facultad de Ingeniería, U.N.L.P., calle 1 y 47 (1900) La Plata, Argentina. <http://www.ing.unlp.edu.ar>

<sup>b</sup>Dpto. de Ingeniería, CICARÉ S.A., Av. Augusto Cicaré 5300 (7260) Saladillo, Argentina. <http://www.cicare.com.ar>

**Palabras claves:** palas de helicópteros, características estructurales, compuestos, rigideces, frecuencia natural

### Resumen

El objetivo fue desarrollar una metodología simple, realizable en una fábrica, que pueda ser llevada a cabo por un técnico de manera de obtener características particulares de la estructura de la pala como son su rigidez flexional (en reposo), la rigidez torsional y la frecuencia natural (sin carga centrífuga).

Primordialmente se buscó que la técnica no demande demasiado tiempo al operario y que arroje las características estructurales básicas de las palas de rotor principal de un helicóptero. Los datos relevados de los ensayos permiten armar una base de datos para el control de calidad de las partes (aceptación o rechazo) y, por otro lado, comparar esos resultados con aquellos obtenidos de ensayos del mismo componente luego de ciertas horas de operación en servicio.

La metodología empleada consiste en colocar una pala de rotor principal, de a una por vez, en un soporte que simula su fijación en el cubo del rotor. En el soporte se coloca un dispositivo que bloquea la bieleta de paso cíclico y colectivo para evitar el giro de la pala ante la carga torsional.

Se determinan las tres características estructurales mencionadas. Para la rigidez flexional se mide la deflexión de la pala bajo la aplicación de una masa conocida en un lugar predeterminado. Para la determinación de la rigidez torsional se aplica una cupla conocida y se mide el ángulo de distorsión bajo ese estado. Finalmente se determina la frecuencia natural midiendo el tiempo en que la pala realiza 20 ciclos u oscilaciones. En todos los casos, los ensayos se realizan sin la aplicación de las cargas externas que se generan en vuelo (carga centrífuga, sustentación, resistencia, etc).

Los resultados obtenidos se resumen en una planilla y se los grafica en función de cada muestra analizada. Cicaré S.A. tiene establecido los rangos de rigideces aceptables los cuales se comparan con los valores medidos en las muestras. El método se aplica a todas las palas antes de ser colocadas en un helicóptero y luego de cierta cantidad de horas de operación. Si existiese alguna anomalía en la estructura de las palas se vería reflejada por

una diferencia en los valores de rigideces. Como caso particular se aplicó la metodología a un conjunto de palas pertenecientes a la flota de helicópteros de la empresa que operan fuera de nuestro país, con 1000 h de servicio acumuladas en condiciones extremas de operación. Del ensayo realizado surgió que la diferencia máxima encontrada en una de las rigideces no supera el 10%. Esta variación en el valor no es significativa a la hora de compararlo con los límites preestablecidos. Este análisis sienta base para un futuro proceso de certificación de estas máquinas.

En conclusión, se ha desarrollado un método práctico, rápido y sencillo que permite a Cicaré S.A. controlar las palas, una vez que son entregadas por el fabricante de ellas, para determinar si son aptas de ser empleadas en sus helicópteros y, eventualmente, para determinar el estado de las mismas luego de cierto tiempo en servicio o ante una condición de operación fuera de los parámetro normales como puede ser la condición de overspeed del rotor principal.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La empresa CICARÉ S.A [1] tiene una larga trayectoria en el desarrollo de helicópteros livianos. Actualmente comercializa en todo el mundo sus modelos Cicaré 7B, Cicaré 7T, Cicaré 8, Cicaré 12 y el entrenador de vuelo Cicaré SVH4. Todos poseen rotores principales semirrígidos como se observa en la Figura 1 y sus palas están fabricadas de materiales compuestos al igual que las del rotor de cola.



Figura 1: Sistema de rotor principal semirrígido (teetering o seesaw)

En los primeros desarrollos, hacia fines de 1950, el Sr. Augusto Cicaré desarrolló palas de rotores principales totalmente fabricadas de maderas laminada recubiertas por tela debido a la poca o nula disponibilidad de materiales más adecuados para la fabricación de estos componentes. No es menor mencionar que los primeros desarrollos se llevaron a cabo en una zona rural, alejada de las grandes urbes.

Con el acceso a nuevos materiales, Augusto Cicaré fue reemplazando a la madera por metales tales como las aleaciones de aluminio para la fabricación de las palas del rotor principal y del rotor cola. En la Figura 2 se aprecia un conjunto de palas de rotor principal metálicas.



Figura 2: Palas de rotor principal de construcción metálica aplicadas en un Cicaré CH4.

Aproximadamente a mediados de 1970 comienza a incursionar, de manera experimental, en el uso de fibras de vidrio embebidas en una matriz poliéster, aplicando por primera vez este tipo de material a palas de rotor principal. La Figura 3 muestra al helicóptero CH 3 con palas de materiales compuestos (4 palas) y también el cubo (del tipo rígido) fabricado del mismo material.



Figura 3: Palas de rotor principal de construcción en materiales compuestos aplicados en un Cicaré CH3 (derecha), cubo de rotor principal de tipo rígido y de materiales compuestos (izquierda).

Sus experiencias prácticas lo llevaron a mejorar los procesos y técnicas de fabricación de este tipo de alas rotativas; la incorporación de resinas más estables como la epoxy y calidades de telas e hilos de fibras de vidrio de mejores características mecánicas hicieron que sus diseños mejoraran, substancialmente, en el desempeño estructural respecto a los antiguos diseños. El know how desarrollado por Cicaré S.A. fue transferido a un fabricante que produce las palas de rotor principal y de rotor de cola, de manera exclusiva, para esta empresa.

En la actualidad la gran mayoría de los fabricantes de helicópteros construyen las palas del rotor principal de materiales compuestos y Cicaré no es la excepción. La empresa tiene una amplia experiencia en servicio con una flota mundial importante, con máquinas que han alcanzado 1000 hs de operación y entrenadores de vuelo que también han acumulado gran cantidad de horas de vuelo. Sobre este último producto se puede decir que son horas exigentes dada la propia operación de entrenamiento en donde se expone a las palas, y a otros componentes del helicóptero cautivo, a condiciones críticas de operación. Las revoluciones del rotor pueden llegar a las mínimas recomendables (baja carga centrífuga) con elevadas cargas dinámicas producto de la práctica de emergencia; en los helicópteros este tipo de estado de carga no se presentan o son de baja probabilidad de ocurrencia.

En el año 2011 Cicaré S.A, sin perder su identidad de empresa I&D, comienza una nueva etapa e inicia su camino en el campo de la producción. En el mencionado año obtiene, de parte de ANAC, el reconocimiento de aeronave de kit para el helicóptero Cicaré 7B y luego Cicaré 7T; esto permitió a la empresa vender los productos de manera local y ser reconocida esta designación de kit en otros países. En agosto del corriente año el producto Cicaré 8 es reconocido como kit por la ANAC. En la Figura N° 4 se presenta la foto del Cicaré 8.



Figura 4: Cicaré 8 en vuelo

Esta nueva etapa disparó un replanteo respecto a lo que se venía realizando: desarrollo de prototipos. Se comenzó con la estandarización de los procesos de fabricación de partes y el desarrollo de protocolos para: armado de partes y conjuntos, ensayos destructivos y no destructivos y procesos de producción; además de la implementación de procesos de control de calidad, entre otros. La metodología planteada en este trabajo es parte del proceso iniciado y comenzó a aplicarse en el año 2011.

Las palas del rotor principal forman parte de los elementos críticos de este tipo de aeronaves, con lo cual merecen particular atención. A partir de este paradigma es que se pensó en una metodología práctica que permita al personal de la empresa determinar ciertos parámetros característicos de las palas y, a partir de la comparación de dichos valores con los límites aceptables, tener una metodología de control de calidad para la aceptación o el rechazo de ellas. Además de lo mencionado, el proceso permite generar una base de datos útil para el seguimiento de la calidad de la fabricación y, eventualmente, para ser utilizada en análisis de situaciones particulares como condiciones de carga fuera de los límites o parámetros de funcionamiento normales.

El análisis de los resultados que se exponen en este trabajo se refiere a un solo tipo de modelo de pala (utilizada en dos modelos de la empresa) pero la metodología es aplicable a todos los modelos de palas de los diferentes helicópteros que produce la empresa. En la Figura 5 se presenta el modelo de pala analizada en este documento.



Figura 5: Palas de materiales compuestos de Cicaré 7 – Cicaré SVH4.

## **2. BASES DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA**

### **2.1. Acrónimos**

- $k$ : Rigidez
- $E$ : Módulo elástico
- $J$ : Momento de inercia
- $\omega_n$ : Frecuencia natural
- $m$ : Masa
- $k_{fmin}$ : Rigidez a la flexión mínima
- $k_{tmin}$ : Rigidez a la torsión mínima
- $n$ : Número de muestras de una población
- $\mu$ : Valor real de una variable
- $\mu_f$ : Valor real de la media de la rigidez flexional
- $\mu_{fmin}$ : Límite inferior del intervalo para la rigidez a la flexión, intervalo de confianza del 95%
- $\mu_{fmax}$ : Límite superior del intervalo para la rigidez a la flexión, intervalo de confianza del 95%
- $\bar{x}_f$ : Valor medio de la rigidez a flexión
- $S_f$ : Desviación estándar a flexión
- $\mu_t$ : Valor real de la media de la rigidez torsional
- $\mu_{tmin}$ : Límite inferior del intervalo para la rigidez a la torsión, intervalo de confianza del 95%

$\mu_{tmax}$ : Límite superior del intervalo para la rigidez a la torsión, intervalo de confianza del 95%

$\bar{x}_t$ : Valor medio de la rigidez a la torsión

$S_t$ : Desviación estándar a la torsión

$\mu_{fn}$ : Valor real de la media de la frecuencia natural

$\mu_{fnmin}$ : Límite inferior del intervalo para la frecuencia natural, intervalo de confianza del 95%

$\mu_{fnmax}$ : Límite superior del intervalo para la frecuencia natural, intervalo de confianza del 95%

$\bar{x}_{fn}$ : Valor medio de la frecuencia natural

$S_{fn}$ : Desviación estándar de la frecuencia natural

$t_{0,025}$ : Estadístico del 5%, t-Student

## 2.2. Rigideces y frecuencias

Toda estructura, independientemente del material que esté construida, posee características que definen su comportamiento ante cargas externas de cualquier índole.

En estructuras hablamos de rigidez, la cual se puede definir como la fuerza que debe ser aplicada a un sistema para obtener una deformación unitaria en la misma dirección y sentido de la carga aplicada. También se la interpreta como la capacidad de una estructura para resistir cambios de forma (alargamiento o distorsión angular) [2].

Para el caso particular de una viga empotrada - libre con una carga puntual en el extremo libre, con módulo elástico y momento de inercia constante, la rigidez se expresa como:

$$k = \frac{3EJ}{L^3} \quad (1)$$

Esta característica de la sección combinada con la masa y el tipo de vínculo definen las características de vibración de la estructura.

Toda estructura tiene una frecuencia natural, la cual depende de las variables mencionadas anteriormente. En general se puede representar a la frecuencia natural de un sistema como:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

Si la masa, la longitud de la viga y la sección no varían sustancialmente al igual que la manera de vinculación, entonces la frecuencia de la estructura variará sólo si su módulo elástico varía.

Para el caso de los materiales compuestos la variación se tendrá, fundamentalmente, en el módulo de elasticidad debido a varios factores y en particular, podemos mencionar, el proceso de fabricación.

La metodología no busca ver el cambio en la frecuencia natural por variación de la rigidez sino que pretende determinar las rigideces en flexión y torsión apropiadas para un correcto funcionamiento del componente en el helicóptero.

De los análisis realizados para el diseño de las palas del rotor principal y en base a la experiencia obtenida en ensayos en vuelo y en operación general, se fijaron límites para la aceptación o rechazo de los conjuntos de palas, esos límites están basados en la rigidez a la flexión y a la torsión.

## 2.3. Valores límites de las rigideces para la aceptación o el rechazo de un conjunto de palas

Podemos decir que el límite superior de la rigidez a la flexión no es necesario establecerlo. Para explicar esta afirmación se presenta el caso ideal de una pala infinitamente rígida.

Para entender esta hipótesis se podría decir que, sin cargas externas producto de la operación, cada pala estaría idealmente recta siguiendo la proyección de una línea que parte del centro del cubo con un cierto grado de inclinación. Cuando la carga centrífuga, producto de la rotación, comienza a actuar, cada pala permanecería con la misma orientación que en reposo y no deformaría por efecto de la fuerza centrífuga (actuando en cada diferencial de masa) debido a su rigidez idealmente infinita; tampoco influiría la fuerza sustentadora en la deformación. Por lo expuesto, se puede concluir que una alta rigidez a la flexión no es una condición crítica para la aceptación del componente.

Por lo contrario, una baja rigidez flexional sería crítica cuando el rotor está en reposo (rotor principal descargado) o con bajas revoluciones (proceso de detención del helicóptero). Dadas las condiciones mencionadas y debido a que el sistema del rotor es semirrígido podría ocurrir que, ante la presencia de una ráfaga de viento, el

sistema oscile, esto último combinado con palas de elevada deformación podría ocasionar un accidente por el impacto de las ellas contra las personas u obstáculos.

De los análisis y experiencias realizadas se estableció el valor de rigidez a flexión mínimo (límite inferior) para la aceptación de un conjunto de palas al valor:

$$k_{fmin} = 0,36 \text{ N/mm}$$

En el caso de la rigidez a torsión, existe claramente un límite inferior mientras que el límite superior no es un limitador para el proceso de aceptación o rechazo de los conjuntos de palas. A continuación se describe el porqué de esta cuestión.

Si la rigidez a torsión fuera idealmente infinita no se tendría distorsión de la sección, con lo cual las fuerzas aerodinámicas que generan la torsión del perfil no modificarían el ángulo de ataque, evitando así que se generen fenómenos de tipo aeroelásticos.

Por otro lado una baja rigidez torsional llevaría a una condición crítica a la sección producto de la distorsión del perfil aerodinámico ya que se experimentarían condiciones de inestabilidad por fenómenos aeroelásticos.

Se ha establecido a partir de los cálculos y la experiencia que el valor de rigidez torsional mínimo (límite inferior) para la aceptación de un conjunto de palas al valor:

$$k_{tmin} = 3,00 \text{ Nm/}^\circ$$

### 3. METODOLOGÍA DESARROLLADA

#### 3.1. Descripción del banco de ensayos

Para la realización de los ensayos se desarrolló un banco específico que permite instalar y ensayar una pala por vez.

El dispositivo diseñado permite ser adaptado a cada modelo de pala de los diferentes modelos de helicópteros que fabrica Cicaré S.A. En la Figura 6 se puede observar a una de las palas del entrenador de vuelo Cicaré SVH4.



Figura 6: Banco de ensayos con una pala de Cicaré 7 – Cicaré SVH4, montada

#### 3.2. Procedimiento

De manera general el procedimiento consiste en, luego de la inspección visual de la pala en estudio, montar el componente en el banco de ensayos simulando una condición de instalación semejante a la del cubo del rotor principal. Se bloquea la bieleta de cambio de paso con el fin de evitar el giro de la pala alrededor del eje de toma.

Por cuestiones prácticas, con el fin de optimizar tiempos, se procede realizando en primer lugar la determinación de la rigidez torsional de la pala y luego la flexional junto con la frecuencia natural (primer modo flexional) libre.

### 3.2.1. Determinación de la rigidez torsional

Para realizar esta determinación es necesario instalar el dispositivo torsional en la puntera de la pala. Esta herramienta consta de un brazo de palanca para poder aplicar el torque y un soporte para ubicar el goniómetro que permite mensurar el ángulo de distorsión del extremo de la pala. Para evitar la deflexión producto de la masa de la herramienta y de la masa propia de la pala, se ubica a aproximadamente al veinticinco por ciento (25%) de la cuerda, un soporte con un eje para que la pala pueda rotar (pivotar) alrededor de su eje longitudinal. En el extremo opuesto se fija la bieleta de cambio de paso al soporte regulable en altura.

Se instala el goniómetro digital en su soporte sobre el dispositivo torsional, encendido y en modo absoluto, se regula la altura del soporte de cambio de paso de manera que el goniómetro indique cero o un ángulo no mayor de  $0,1^\circ$ . Posteriormente se cuelga una masa patrón en el extremo del brazo de palanca, se la va liberando lentamente hasta alcanzar el nuevo punto de equilibrio. Esta primera medición se descarta, es solo para que el sistema se acomode. Se descarga y se vuelve a verificar el ángulo inicial; si éste es menor a  $0,2^\circ$  (en módulo) no es necesario realizar la corrección de la longitud del brazo de palanca. Finalmente se pone en cero el goniómetro, se anota en la planilla como ángulo inicial, se aplica la carga liberándola lentamente hasta alcanzar el equilibrio, se determina el ángulo final alcanzado anotándolo en la planilla con su correspondiente signo, posteriormente se libera la carga. En caso que el ángulo inicial alcanzado tenga un valor diferente de cero, se lo anota en la planilla con su signo. Se repite la operación dos veces más.

Se procesa la información determinándose la rigidez torsional de la pala haciendo el cociente entre el torque aplicado [Nm], eventualmente corregido por la variación del brazo de palanca, y la diferencia angular  $[\circ]$ . En las Figura 7 se muestra en banco de ensayos con el dispositivo para la aplicación de torque y medición de la distorsión de la sección.



Figura 7: Pala de Cicaré 7 – Cicaré SVH4 montada en el banco para realizarle la medición de rigidez torsional

### 3.2.2. Determinación de la rigidez a la flexión

Retirado el dispositivo torsional de la pala se la libera para que tome la deflexión natural (posición de reposo) por la acción de su propia masa. Posteriormente se coloca en la zona de la puntera una masa patrón ubicándola al cuarto de la cuerda y en la proximidad del borde de la punta de pala. En la figura N° 8 se observa lo mencionado,



una cinta de color verde delimita la posición de la masa patrón. La primera deflexión de la pala, producto de la masa patrón, no se mensura, simplemente es para que el sistema se acomode.

Se retira la masa y el sistema toma la nueva posición de equilibrio. Mediante una cinta graduada se mide la deflexión inicial. Para esta medición se toma como referencia el centro del tornillo de balanceo. Se vuelve a aplicar la masa en el lugar señalado anteriormente y se mensura la deflexión final. Se anotan en una planilla los valores iniciales y finales de deflexión, se repite la operación dos veces más.

Finalmente se calcula la rigidez flexional como el cociente entre la fuerza aplicada [N] y la diferencia de las deflexiones en el extremo de la pala [mm]. En la Figura 8 se puede observar la pala en el proceso de determinación de su rigidez flexional.



Figura 8: Pala de Cicaré 7 – Cicaré SVH4 montada en el banco para realizarle la medición de rigidez flexional

### 3.2.3. Determinación de la frecuencia natural libre (primer modo)

El objetivo fundamental, como se planteó, fue desarrollar un método práctico usando equipo básico y obtener, a partir de los ensayos, las características de rigidez a la flexión y a la torsión de las palas del rotor principal como criterio de aceptación (control de calidad). Como dato complementario se determinan las frecuencias naturales libres de las palas que podrían ser utilizadas en futuros estudios. La determinación de la frecuencia natural del sistema se realiza, simplemente, contando las oscilaciones de la pala cuando esta es apartada de su equilibrio y cronometrando el tiempo en que la pala realizar veinte (20) oscilaciones.

El procedimiento se realiza tres veces para obtener un promedio. Esta característica no es tomada como criterio de aceptación o rechazo de las palas.

## 4. ANALISIS DE LOS DATOS

Los datos relevados y analizados corresponden a dos productos de la empresa, Cicaré 7B y SVH-4, que poseen palas de rotor principal de iguales dimensiones y características constructivas.

Se analizaron los valores de las rigideces y la frecuencia natural con el fin de comprobar si la distribución de frecuencias era normal (distribución de Gauss). Se recurrió al software estadístico para realizar el test de normalidad, no paramétrico, prueba de Kolmogorov-Smirnov [3]. El resultado de la prueba indica que los valores obtenidos en los ensayos cumplen con las condiciones establecidas para que un conjunto de muestras tengan distribución normal. En las Figuras 9, 10 y 11 puede observarse el tipo de distribución.

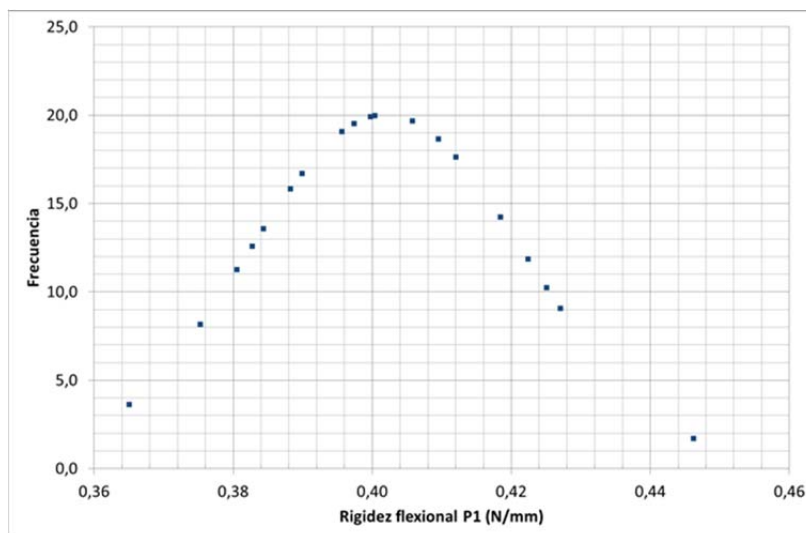


Figura 9: Distribución Gaussiana de la Rigidez flexional de la Pala 1

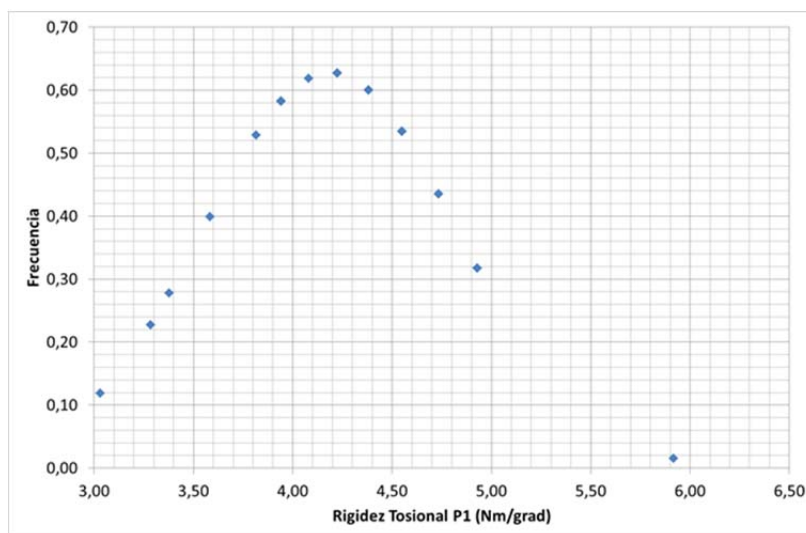


Figura 10: Distribución Gaussiana de la Rigidez torsional de la Pala 1

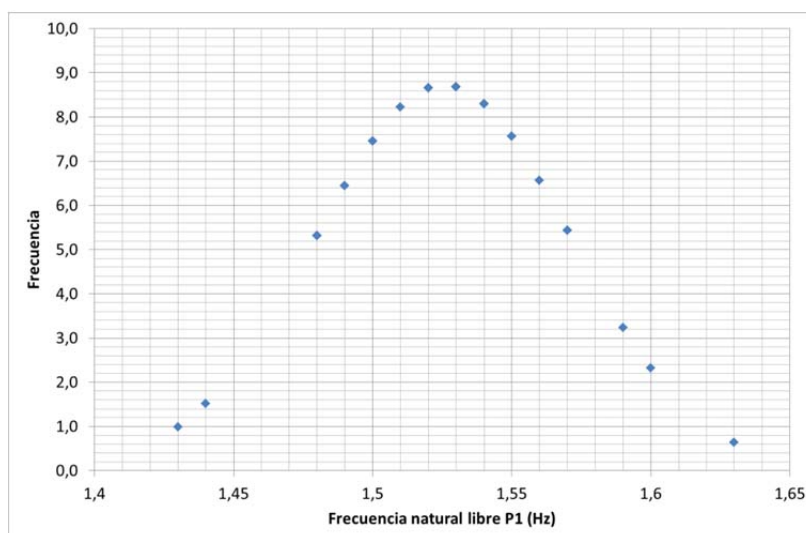


Figura 11: Distribución Gaussiana de la frecuencia natural de la Pala 1

A continuación se presenta la Tabla 1 con los valores obtenidos de los ensayos realizados sobre una de las palas (Pala 1).

Muestras	P1	P1	P1
	[N/mm]	[Hz]	[Nm/°]
	Flexión		Torsión
1	0,41	1,52	4,38
2	0,40	1,48	2,95
3	0,38	1,48	5,92
4	0,38	1,54	4,55
5	0,38	1,53	4,22
6	0,40	1,50	4,55
7	0,37	1,43	3,58
8	0,40	1,54	4,22
9	0,40	1,49	3,82
10	0,41	1,52	3,94
11	0,42	1,55	4,38
12	0,43	1,56	4,73
13	0,38	1,48	3,38
14	0,43	1,59	4,93
15	0,42	1,60	4,55
16	0,42	1,57	4,38
17	0,41	1,57	3,03
18	0,41	1,50	3,28
19	0,43	1,55	4,73
20	0,40	1,53	4,08
21	0,39	1,54	3,94
22	0,38	1,44	4,93
23	0,39	1,51	3,94
24	0,38	1,49	3,94
25	0,41	1,53	4,22
26	0,45	1,63	4,55
27	0,41	1,52	3,94

Tabla 1: Resumen de resultados de los ensayos (continuación)

Medir una propiedad, en este caso rigideces y frecuencias, supone admitir que estas poseen un valor definido, el valor real denominado  $\mu$ . Las propiedades de las palas se han determinado a partir de medir deflexiones y distorsiones con instrumentos de medición directa como es la cinta graduada e indirecta en el caso del goniómetro electrónico digital. Como fue mencionado anteriormente para producir las deformaciones y giros de las secciones de las palas se utilizaron dispositivos basados en masas y brazo de palanca calibrados.

Es de destacar que las masas e instrumentos utilizados siempre son los mismos, el ambiente donde se realizan las mediciones está a temperatura estable, libre de vibraciones y con buena iluminación, por otro lado el operador es siempre el mismo y está entrenado para la realización de estos ensayos. Con estas condiciones los errores de medición son minimizados, sin embargo a pesar de las condiciones establecidas podremos observar que los resultados obtenidos son diferentes, esto se debe a las indeterminaciones inherentes al proceso de medición. Para una buena estimación del valor real se deben realizar múltiples medidas en iguales condiciones y luego promediar los resultados y analizarlos con herramientas estadísticas, que es lo realizado en este procedimiento.

A cualquier resultado de una medida experimental se le debe exigir que sea exacto y preciso. Podríamos resumir diciendo que la precisión dependerá del grado de dispersión de los datos y la exactitud de la diferencia entre los valores medidos y el valor real. La forma de cuantificar la dispersión de los resultados es analizando la varianza  $S^2$  y la desviación estándar  $S$  (raíz de la varianza) es también una medida de la dispersión de los valores observados.

Como se mencionó la distribución de las muestras es normal pero el número de muestras es inferior a 30, estas dos condiciones hacen que sea recomendable analizar los resultados mediante la metodología  $t$  de Student.

#### 4.1. Obtención del intervalo de confianza del 95% para la rigidez flexional y torsional

A continuación se procede a determinar el intervalo de confianza del 95% de la media de todas las rigideces flexionales de la Pala 1.

De los datos de la Tabla 1 y usando una planilla de cálculo se determinan:

$$\begin{aligned}\bar{x}_f &= 0,40 \text{ N/mm} \\ S_f &= 0,02 \text{ N/mm} \\ n &= 27\end{aligned}$$

Como se ha tomado un intervalo de confianza del 95% se determina el estadístico  $t_{0,025}$  para 26 grados de libertad. El valor se establece utilizando la tabla  $t$ -Student [4], se tiene:

$$t_{0,025} = \pm 2,0555$$

Aplicando la ecuación

$$\bar{x}_f - t_{0,025} \times \left( \frac{S_f}{\sqrt{n}} \right) < \mu_f < \bar{x}_f + t_{0,025} \times \left( \frac{S_f}{\sqrt{n}} \right) \quad (3)$$

se establece el intervalo de confianza obteniéndose que:

$$\begin{aligned}\mu_{f\min} &= 0,39 \text{ N/mm} \\ \mu_{f\max} &= 0,41 \text{ N/mm}\end{aligned}$$

Determinado el intervalo de confianza se puede afirmar que el valor real de la media de la rigidez flexional ( $\mu_f$ ) de la Pala 1 tiene un 95% de probabilidad de estar comprendido dentro del intervalo obtenido.

De manera semejante se analiza a los valores de la rigidez torsional, de ese análisis se obtiene:

$$\begin{aligned}\bar{x}_t &= 4,19 \text{ Nm}^\circ \\ S_t &= 0,64 \text{ Nm}^\circ \\ n &= 27 \\ t_{0,025} &= \pm 2,0555\end{aligned}$$

Aplicando la ecuación

$$\bar{x}_t - t_{0,025} \times \left( \frac{S_t}{\sqrt{n}} \right) < \mu_t < \bar{x}_t + t_{0,025} \times \left( \frac{S_t}{\sqrt{n}} \right) \quad (4)$$

se establece el intervalo de confianza obteniéndose que:

$$\begin{aligned}\mu_{t\min} &= 3,98 \text{ Nm}^\circ \\ \mu_{t\max} &= 4,40 \text{ Nm}^\circ\end{aligned}$$

De la misma manera que para el caso anterior, se puede afirmar que el valor real de la media de la rigidez torsional ( $\mu_t$ ) de la pala 1 tiene un 95% de probabilidad de estar comprendido dentro del intervalo obtenido.

#### 4.2. Obtención del intervalo de confianza del 95% para la frecuencia natural

Procediendo con la misma metodología se obtiene el intervalo de confianza para la frecuencia natural de la Pala1.

$$\begin{aligned}\bar{x}_{fn} &= 1,53 \text{ Hz} \\ S_{fn} &= 0,04 \text{ Hz} \\ n &= 27\end{aligned}$$

$$t_{0,025} = \pm 2,0555$$

Como se ha tomado un intervalo de confianza del 95% se determina el estadístico  $t_{0,025}$  para 26 grados de libertad. El valor se establece utilizando la tabla t-Student [4], se tiene:

Aplicando la ecuación

$$\bar{x}_{fn} - t_{0,025} \times \left(\frac{S_{fn}}{\sqrt{n}}\right) < \mu_f < \bar{x}_{fn} + t_{0,025} \times \left(\frac{S_{fn}}{\sqrt{n}}\right) \quad (5)$$

se establece el intervalo de confianza obteniéndose que:

$$\begin{aligned} \mu_{fnmin} &= 1,51 \text{ Hz} \\ \mu_{fnmax} &= 1,54 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Se puede afirmar que el valor real de la media de la frecuencia natural ( $\mu_{fn}$ ) de la Pala 1 tiene un 95% de probabilidad de estar comprendido dentro del intervalo determinado.

### 4.3. Distribución de las rigideces. Resumen gráfico de los ensayos

Las Figuras 12 y 13 muestran las distribución de los resultados de los ensayos realizados sobre las 27 muestras correspondientes a las palas del rotor principal de los helicópteros.

Vale aclarar que el valor medio de las rigideces flexionales de ambas palas son coincidentes es por ello que se presenta una sola figura, vale lo mismo para la rigidez torsional.

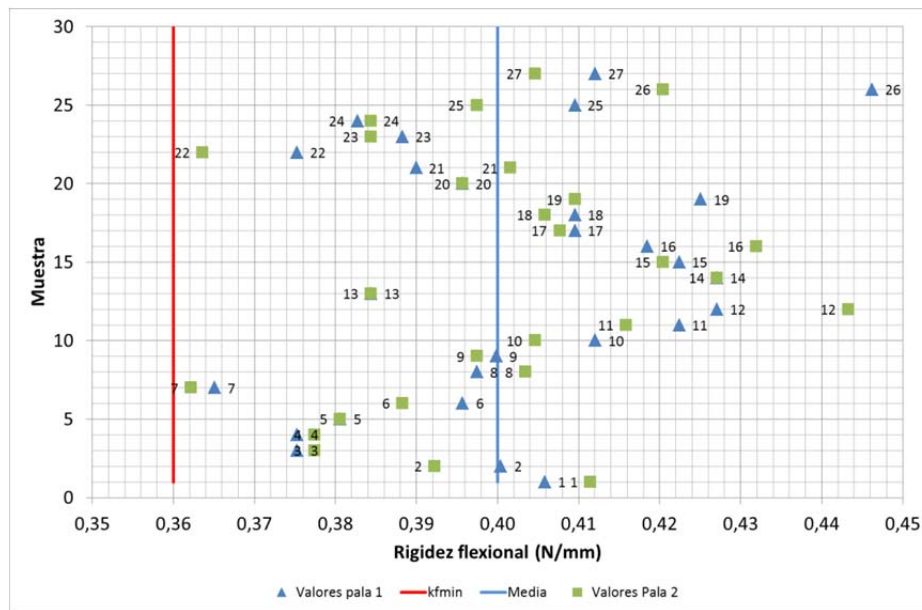


Figura 12: Resumen de rigideces flexionales

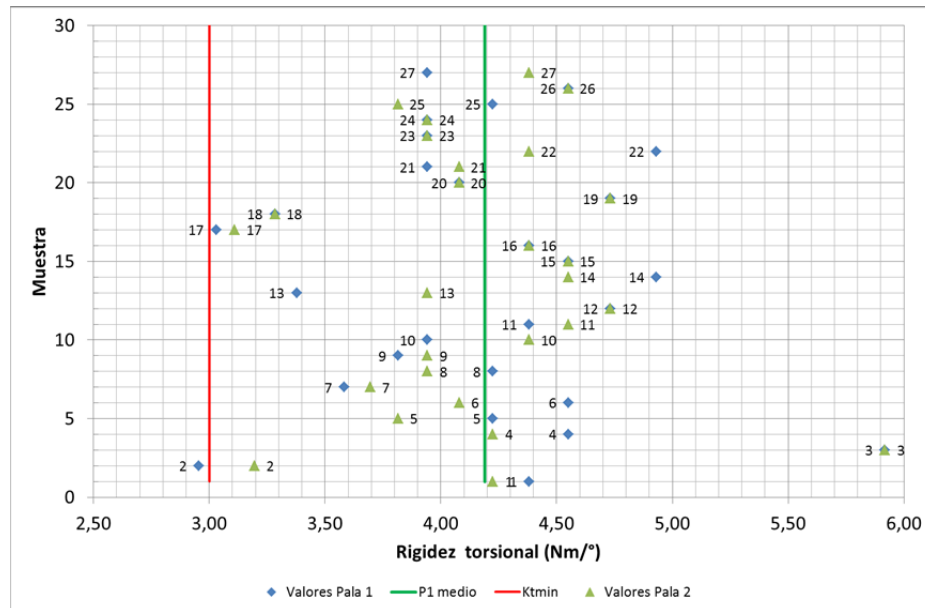


Figura 13: Resumen de rigideces torsionales

Si en la figura N 13 se analizan, por separado, los pares de palas, es posible observar que los valores de la rigideces flexionales y torsionales de los pares poseen baja dispersión. En general entre pares de palas, considerando que se trata de materiales compuestos con un proceso de fabricación por el método de impregnación manual, la dispersión de valores es muy aceptable.

## 5. CONCLUSIONES

El procedimiento desarrollado resultó ser práctico y de simple ejecución, utilizando elementos básicos para la determinación de parámetros característicos tales como la rigidez flexional y torsional.

Los resultados son suficientemente precisos como para permitirle a la empresa contar con una metodología para la aceptación o rechazo de estos componentes críticos. Los datos que surgen del procedimiento son una herramienta más en el proceso de evaluación de la calidad de las partes.

Contar con una base de datos adecuada, representativa de la realidad, ha permitido evaluar dos casos particulares ocurridos fuera del país. Los casos fueron: a) sistema de rotor principal sometido a una sobre velocidad de rotación (overspeed), b) rotor principal, con 1000 hs de servicio, en condiciones ambientales y de operación extremas. Para el caso a), basándose en inspecciones específicas y aplicando la metodología descripta, fue posible evaluar la condición final de los componentes luego del incidente y definir su continuidad en servicio. En el caso b) las palas fueron traídas a nuestro País y sometidas a inspecciones funcionales, visuales y evaluadas por la metodología planteada en este trabajo. Luego de aplicada la técnica fueron determinados los valores de rigideces y frecuencias naturales de ambas palas para ser comparados con los valores medios y originales obtenidos antes que las partes salieran de fábrica. La desviación encontrada en la rigidez flexional, en el caso más desfavorable, fue inferior al 10% respecto al valor original. Más allá de la diferencia encontrada, los valores de las rigideces determinadas luego de 1000 hs de operación cumplen con las condiciones de rigidez flexional y torsional mínimas establecidas para la aceptación o rechazo de las partes.

## REFERENCIAS

- [1] *Página Web de Cicaré S.A.*: <http://www.cicare.com.ar>
- [2] J. Gere, *Mecánica de materiales*: Thomson Learning, 2002
- [3] *Prueba Kolmogorov-Smirnov hipótesis de normalidad*: [http://www.ub.edu/aplica\\_inform/spss/cap5-6.htm](http://www.ub.edu/aplica_inform/spss/cap5-6.htm)
- [4] *Tabla T-Student*: [cms.dm.uba.ar/academico/materias/1ercuat2015/probabilidades.../tabla\\_tstudent.pdf](http://cms.dm.uba.ar/academico/materias/1ercuat2015/probabilidades.../tabla_tstudent.pdf)