

# Análisis de la estructura primaria cap del helicóptero Bell UH-1H II (Huey II)<sup>1</sup>

## RESUMEN

Los helicópteros Bell Huey II hacen parte de la flotilla de aeronaves donadas a Colombia por la Embajada de Estados Unidos en el marco del Plan Colombia. El índice operacional de estas máquinas es demasiado alto para las horas de vuelo de su fuselaje, a pesar de que se les efectuaron muy pocas modificaciones en su proceso de repotenciación iniciado en el año 1999 (en el caso de la Policía). Desde entonces, se empezó a presentar el fenómeno de rajadura de la pieza estructural cap y, hasta el momento, no se ha determinado una solución por parte de la empresa fabricante ni de las Fuerzas Militares, entre ellas la Policía Nacional, a las que se les presenta este problema. Este trabajo centra su atención en este fenómeno.

## PALABRAS CLAVE:

Elementos finitos, grietas por fatiga, análisis de falla, kt (nudos: unidad de velocidad), vida segura (safe life).

### Autores

Gustavo Alfonso Rodríguez<sup>2</sup>

William Romero Murcia<sup>3</sup>

Angie Soler Galindo<sup>4</sup>

### Director

Andrés Guasca González<sup>5</sup>

1. Proyecto curricular de Ingeniería Mecánica.
2. Ingeniero mecánico. Correo electrónico: gustavoadolfoalonso@gmail.com
3. Ingeniero mecánico. Correo electrónico: warriorgear@gmail.com
4. Ingeniera mecánica. Correo electrónico: angiepepe@gmail.co
5. Ingeniero mecánico, docente de la Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: agguascag@udistrital.edu.co

## 1. Introducción

Es prioritario conocer la posible causa del rompimiento de los cap, con miras a que la Policía Nacional gestione ante la empresa fabricante, Bell Helicopter Textron, una solución propia al problema, que generará una reducción en el tiempo de mantenimiento de las aeronaves, y se evitará así un posible accidente en vuelo. Con el proyecto se obtienen datos útiles que logran generar una propuesta sólida por parte de la Policía Nacional ante la empresa fabricante, que luego de varias solicitudes no se ha pronunciado para dar una solución viable a este problema.

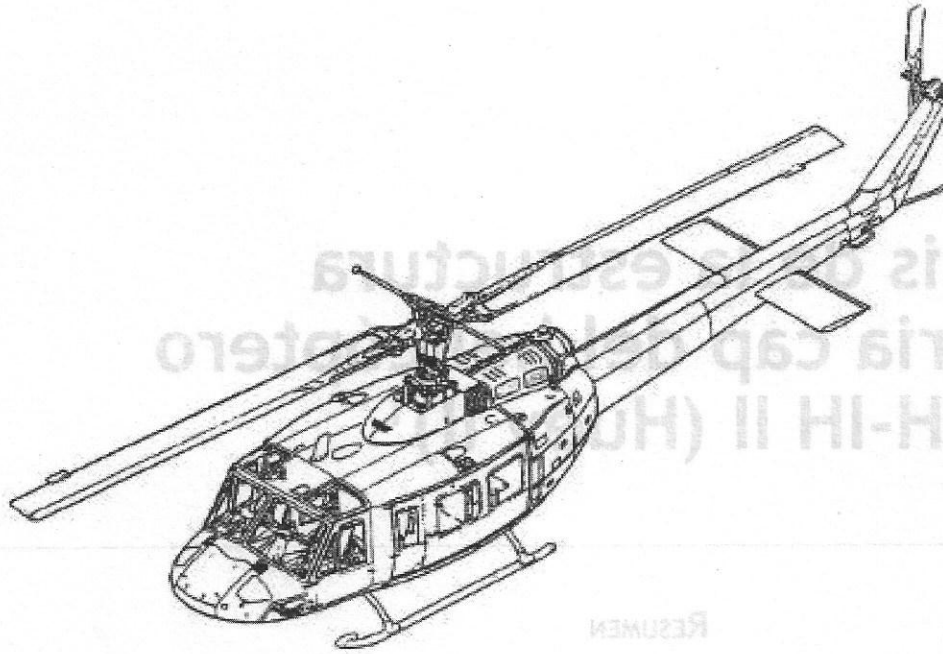


Figura 1. Bell UH-1H II

El análisis consta de tres procesos básicos. El primero es una comparación de datos estadísticos obtenidos directamente de los helicópteros; el segundo es un análisis de materiales que implica conformado, metalografía y composición química; y el tercero es el estudio de la pieza, en el cual se aplica la teoría de elementos finitos, teniendo en cuenta las restricciones que genera una aeronave de tipo táctico.

## 2. Generalidades del Bell Huey II

El programa de modernización Huey II es la única mejora existente hoy en día para UH-1H, al que supera en calidad y funcionamiento. El Huey II combina los nuevos componentes dinámicos comerciales con un motor más confiable, el Honeywell T53-L-703, lo que lleva a un aumento de potencia de casi un 275% en condiciones calientes. Además, aumenta el peso máximo de arranque a 10500 lb, mientras disminuye el costo directo de operación en casi un 30%.

<b>Rendimiento</b>	
	240 km / h, 130 nudos
<b>Máximo crucero</b>	212 km / h, 115 nudos
<b>Peso bruto máximo</b>	4762 kg, 10500 libras
<b>Rango</b>	469 km, 253 nm
<b>Techo</b>	16000 m +
<b>Capacidad</b>	
<b>Tripulación requerida</b>	1
<b>Tropas / pax</b>	11
<b>Capacidad de carga del gancho</b>	2268 kg, 5000 libras
<b>Capacidad de combustible</b>	799 litros, 211 galones
<b>Máxima resistencia</b>	2,8 horas (sin celdas auxiliares)
<b>Costo de operación</b>	
~ 30% menos que los costos directos de operación del UH-1H	

Tabla 1. Generalidades operacionales del helicóptero Bell UH-1H II



## 2.1. Repotenciación del Bell UH-1H (Huey) a Bell UH-1H II (Huey II)

El fuselaje principal se mantiene en la configuración del UH-1H con los refuerzos estructurales provistos por el kit, para soportar el aumento de potencia, a similitud del Bell 212, como se relaciona a continuación:

- Cambio de cono de cola con todos los componentes a modelo Bell 212.
- Kit para conversión de la transmisión principal a modelo Bell 212.
- Cambio de mástil, platillo oscilante y controles a modelo Bell 212.
- Cambio de rotor principal y palas a modelo Bell 212.
- Cambio de rotor de cola y palas a modelo Bell 212.
- Cambio de cajas de engranaje de 42 y 90 grados a modelo Bell 212.
- Cambio de ejes impulsores y colgantes de rotor de cola a modelo Bell 212.

Todos los componentes mencionados son nuevos a cero horas. La conversión del motor para uso en el Huey II está separada del kit de conversión. El motor se envía a un taller aprobado por el fabricante, el Honeywell. El motor original, modelo T53-L13, se convierte a modelo T53-L703. Toda la flota de Huey asignada a la Policía Nacional estuvo sometida a esta modificación.

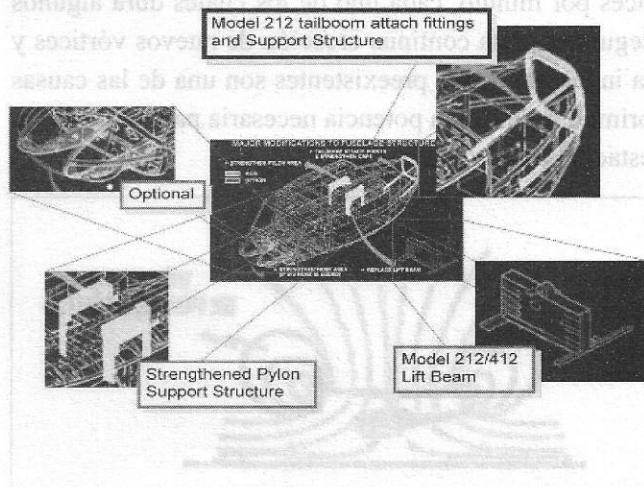


Figura 2. Modificaciones aplicadas al Huey UH-1H

## 2.2. Ubicación del cap dentro de fuselaje de la aeronave

A continuación, se muestra la ubicación de la pieza estructural cap, razón del proyecto de grado. Como se puede ver, la estructura consta de dos cap simétricos. Los antecedentes muestran que solo se rompe uno de los dos, ya sea el izquierdo o el derecho. Para poder observar la pieza tal como se aprecia, y de ser necesario cambiarla, es prioritario desensamblar la mayor parte de la aeronave.

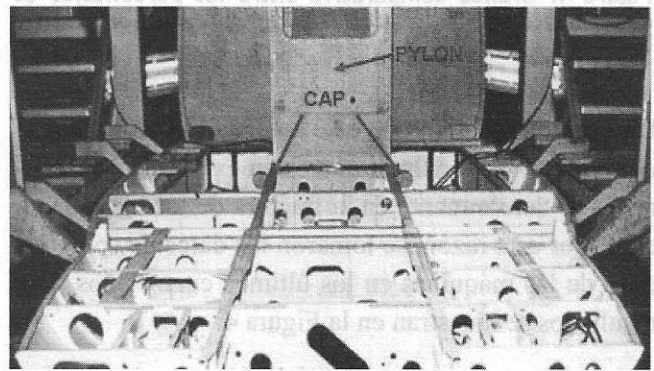


Figura 3. Ubicación del cap en el fuselaje

## 3. Inicio de la ruptura del cap: análisis estadístico

Las aeronaves Huey II fueron fabricadas entre 1965 y 1970, por lo tanto, su degradación puede ser un factor considerable por cuanto esta estructura no estaba diseñada para un motor más potente, como es el T53-L-703. Desde el 17 de abril de 2004, se empezaron a encontrar rupturas del cap en las aeronaves. El primer hallazgo se localizó en el PNC 0707 que afectó el cap izquierdo y en el Fitting 129 Station, que afectó el lado izquierdo.

Para determinar el número de horas de vuelo de las aeronaves en las que se presentó rajadura de cap, se realizó la media aritmética en la totalidad de la flota que ha presentado la falla, con base en el número de horas a las que se presentó la primera falla. Se obtuvo como resultado 1.549,5 horas. Para ello, se exceptuaron los valores dispersos del 0732, 0734, 0736 y 0740, que no se encuentran dentro del promedio en los que se presentaron las fallas.

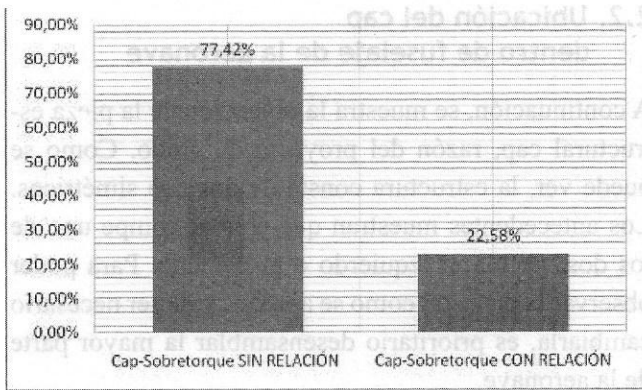


Figura 4. Gráfica comparativa entre los porcentajes de cap-sobretorque sin relación y cap-sobretorque con re-

Uno de los objetivos de este análisis es determinar si el modo de operación al que están expuestas las aeronaves es determinante en la fractura de los main beam caps. Por esta razón, se tomaron los datos de sobretorques de las máquinas en los últimos cuatro años. Los resultados se muestran en la Figura 4.

Los 24 casos que no presentan aparente relación entre los sobretorques y daño de cap equivalen al 77,42% del total de las aeronaves; el 22,58% restante presentan aparente relación, lo cual no debe ser considerado relevante para pensar que los sobretorques fueran una causa de la ruptura de los main beam caps.

Para concluir, es necesario tener en cuenta la incidencia de la celda auxiliar de combustible izquierda en el daño de los mencionados caps. Hasta la fecha de culminación de esta investigación, se tuvo conocimiento

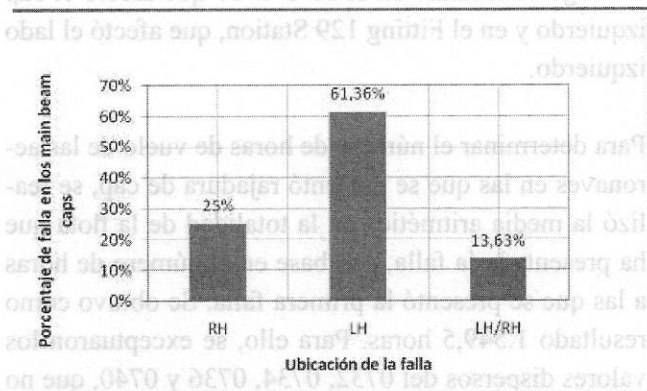


Figura 5. Ubicación de los cap rajados

de 44 main beam caps dañados en la flota Huey II, de los cuales 27 fueron cap izquierdos, 11, derechos y 6, cap derecho e izquierdo a la vez (esto quiere decir que el daño se encontró en la misma inspección, lo que no garantiza que haya ocurrido al mismo tiempo).

Como se observa, el 61,36% de las fallas corresponde a los main beam caps del lado izquierdo y el 25%, a los main beam caps del lado derecho. Desde el año 2001 aproximadamente, se implementó el uso de las celdas auxiliares de combustible en la flota Huey de la Policía Nacional, abarcando tanto los Huey I como los Huey II; en ese entonces, no se habían repotenciado todas las aeronaves, y las celdas que siempre se han usado en la Policía son para el lado izquierdo. Este aditamento es original del Huey I, por lo cual la casa fabricante Bell autorizó por manual el uso de tales celdas en los Huey II.

#### 4. Sustentación del ala rotatoria semirrígida

##### 4.1. El flujo del aire en vuelo estacionario

En estacionario, los vórtices de punta de pala (remolinos de aire en la puntera de las palas) reducen la eficiencia de la porción externa de la misma. Igualmente, los vórtices de la pala precedente afectan el desempeño de la pala siguiente. Si los vórtices generados por el pasaje de una pala permanecen por unos pocos segundos, entonces, dos palas girando a 350 rpm crearan 700 vórtices por minuto, cada uno de los cuales dura algunos segundos. Esta continua creación de nuevos vórtices y la ingestión de los preexistentes son una de las causas primarias de la alta potencia necesaria para sostener un estacionario.

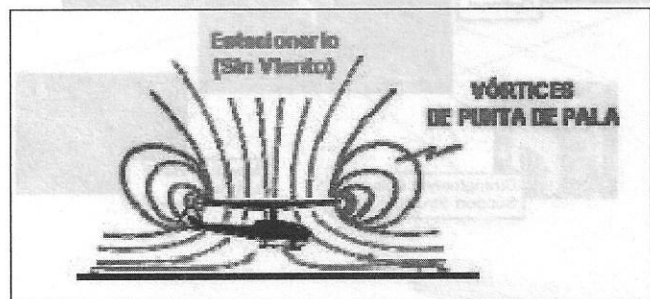


Figura 6. Vórtices de punta de pala en estacionario [1]



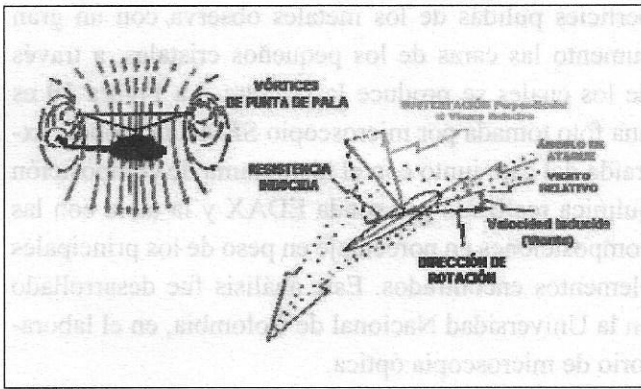


Figura 7. Estacionario fuera de efecto suelo [1]

Durante el estacionario, el rotor mueve grandes volúmenes de aire en sentido descendente. Este proceso de “bombeo” del aire hacia abajo genera velocidades que pueden alcanzar entre 60 y 100 kt, dependiendo de la medida del rotor y del peso operativo del helicóptero. El modelo del flujo de aire en vuelo estacionario se representa en la Figura 7.

Véase cómo el flujo de aire hacia abajo (flujo inducido) ha introducido otro elemento en el viento relativo, el cual altera el ángulo de ataque del perfil. Cuando no existe flujo inducido, el viento relativo es opuesto y paralelo a la trayectoria de vuelo del perfil.

En el caso del vuelo estacionario, el flujo de aire descendente altera al viento relativo, cambiando el ángulo de ataque y produciendo una menor fuerza de sustentación. Esta condición requiere que el piloto aumente el paso colectivo, para producir una mayor fuerza aerodinámica, y así poder sostener un vuelo estacionario. A pesar de que esto incrementa la sustentación, también incrementa la resistencia inducida, y por lo tanto la potencia requerida es mayor. [1]

#### 4.2. Cálculo de la fuerza de sustentación del ala rotativa

Se tiene en cuenta la ecuación de Bernoulli aplicada a un helicóptero:

$$P_2 = ((P_1 - (\rho_1 * g)) + (0.5(\rho_2 * v^2))) \quad (1)$$

$P_1$  es la presión atmosférica sobre el plano de la hélice;  $\rho_1$ , la densidad del aire sobre el plano de la hélice;  $g$ , la gravedad;  $\rho_2$ , la densidad del aire bajo el plano de la hélice;  $v$ , la velocidad del aire bajo la hélice. Los valores en nuestro caso son:

- 66,61 KPa. Fuente: Planetario Distrital a la altura de Bogotá.
- 0,679 . Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam).
- 9,803 . Fuente: Ideam.
- . Fuente: Ideam.
- . Fuente: Cape Canaveral.
- La presión atmosférica bajo el plano de la hélice es 67,19 .
- fuerza ejercida por la máquina para despegar
- 
- Área formada por el círculo de giro de la hélice (radio = 11 ft, 8,65 in = 3,6 m).
- 
- 

### 5. Metalografía y microscopia de las probetas del cap

El análisis metalográfico fue realizado en las instalaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en el laboratorio de metalografía, y se buscaba determinar el tipo de fabricación de este material, sus características microestructurales y comparar con los resultados metalográficos del Metals Handbook [2]. Las muestras para el ensayo metalográfico se toman de cinco trozos de toda la longitud del cap. Una pieza se

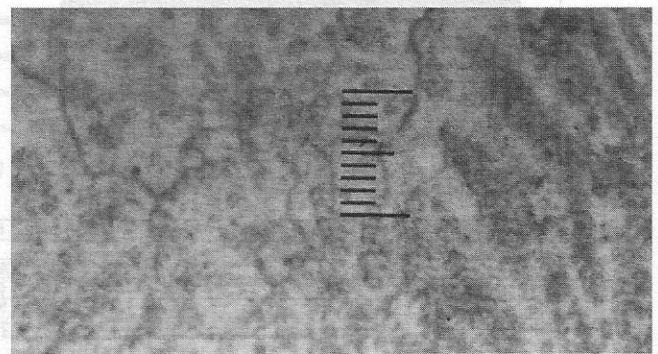


Figura 8. Microfotografía a 500X, 7075 T6.

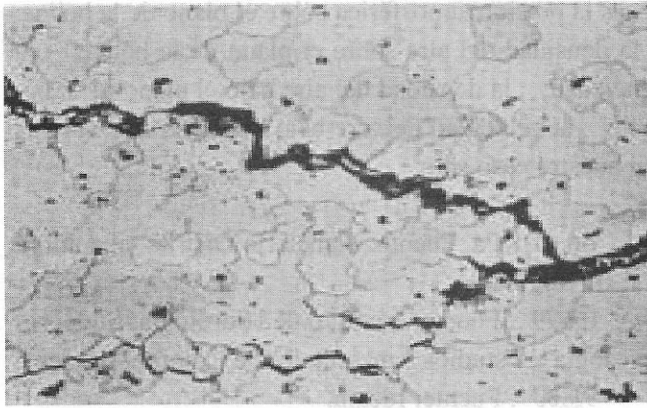


Figura 9. Microfotografía a 200X, 7075 T6 [2].

tomó de la punta del perfil; la segunda y la tercera, del sitio de falla; la cuarta y la quinta son de la parte intermedia del material.

Se observa una microestructura con un grano alargado producto de una conformación en frío. En la parte media inferior y derecha inferior se aprecian líneas de precipitados (corrosión intragranular).

### 6. Fractografía y análisis químico

La fractografía es una técnica microscópica con aumento de 500 a 1.000, que en vez de examinar las su-

perfiles pulidas de los metales observa con un gran aumento las caras de los pequeños cristales, a través de los cuales se produce la fractura. La Figura 10 es una foto tomada por microscopio SEM a la probeta extraída del cap, junto con el histograma de composición química realizado por sonda EDAX y la tabla con las composiciones en porcentaje en peso de los principales elementos encontrados. Este análisis fue desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, en el laboratorio de microscopía óptica.

### 7. Análisis de grieta utilizando el software Afgrow, para elementos finitos

En 1980 se dio a conocer el primer programa para aplicación de elementos finitos, para la predicción, vida y crecimiento de grietas, con el nombre de ASDGRO. Fue escrito en lenguaje BASIC por IBM-PCs y diseñado por Ed Davidson en ASD/ENSF. En 1985, ASDGRO se usó bajo contrato por Warner-Robins ALC, como base para el análisis de crecimiento de grieta para el helicóptero Sikorski H-53.

En la actualidad, es un software desarrollado por el laboratorio de investigación de la Fuerza Aérea de los

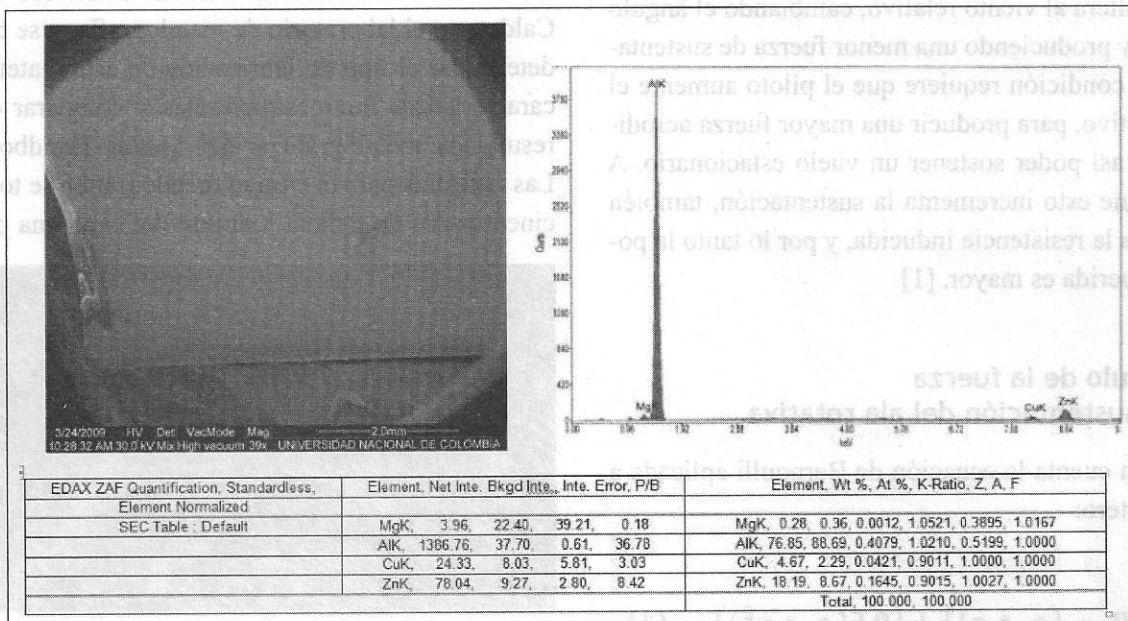


Figura 10. Análisis de composición química realizado a la matriz (probeta 2)



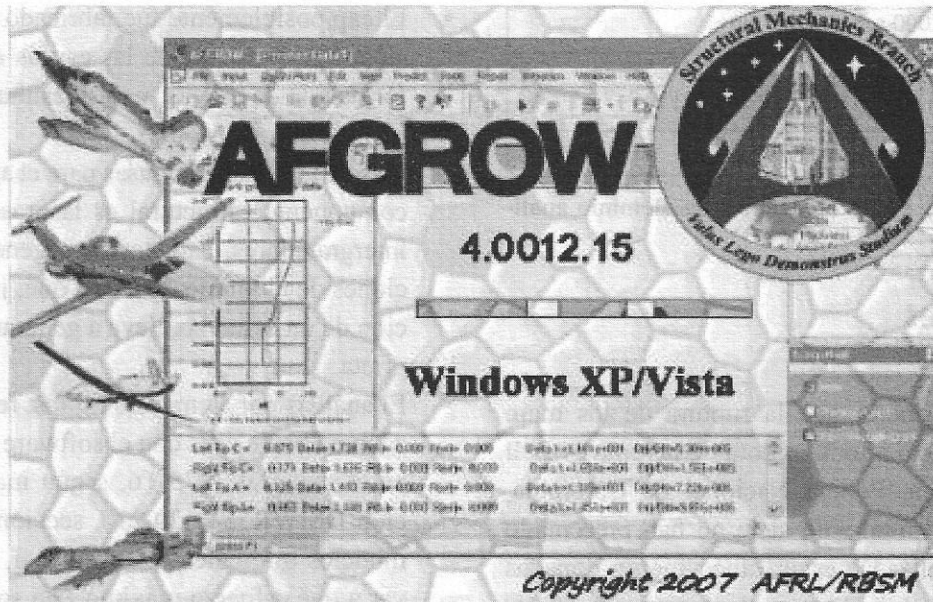


Figura 11. Software Afgrow

Estados Unidos de Norteamérica (Air Force Research Laboratory), versión Afgrow para Windows XP/VISTA, 4.0012.15 [2].

### 7.1. Características

Las características destacables del programa son:

- Los métodos y ecuaciones para escoger el material manejan implícitamente la teoría de mecánica de fractura.
- Analiza grietas detectadas por medio visual o de ensayos no destructivos.
- Interpreta los resultados, determinando el número de ciclos necesarios para que las grietas alcancen su longitud crítica (espectros de carga).
- Se puede determinar por medio de iteración los esfuerzos a los que está sometida la pieza que se está analizando.

### 8. Análisis de resultados

En los datos de sobretorqueo, recolectados en el análisis estadístico, desde el año 2006, no se encontró una relación notoria entre los sobretorques y la ruptura de

los cap. De hecho, en la mayoría de estas aeronaves se ha presentado esta falla estructural sin haber sufrido sobretorque alguno. El porcentaje de cap izquierdos rajados es considerable respecto a los cap derechos. La ubicación de la celda izquierda es un factor agravante, pero no la razón principal por la cual el cap se está fracturando.

Realizando un análisis metalográfico al main beam caps, se puede determinar que se fabricó mediante extrusión, con base en la superficie del cap y en la teoría concerniente a las microestructuras propias de la extrusión. Cabe anotar que la pieza de análisis presenta defectos en el acabado superficial, tales como estrías. Al analizar las distintas probetas, extraídas de un cap de aleación 7075-T6, según manual de reparación DMWR55-1520-210, sección 4-111, realizando un estudio con la sonda edax, se llega a la conclusión de que sus porcentajes de aleantes no corresponden a los porcentajes típicos de una aleación 7075.

En este análisis de resultados se incluye la evolución que ha tenido el 7075-T6, el desarrollo de nuevos materiales, como el 7475-T7351, sin dejar de lado las restricciones de peso y confiabilidad impuestas por el departamento de diseño de Bell.

1.000-9.000 series aluminio				
	7075-T6	7075-T651	7075-T6511	7475-T7351
Densidad	2,8	2,8	2,8	2,8

Tabla 4. Densidades de las aleaciones de aluminio analizadas

## 9. Conclusiones

- Se puede considerar que la ruptura de los main beam caps afecta a toda la flota de aeronaves Bell UH-1H II de la Policía Nacional de Colombia, puesto que del total solo siete no han presentado este tipo de falla. De estas, cinco fueron donadas hace menos de dos años por el convenio con Estados Unidos, es decir, no han tenido aún operación notoria en comparación con las aeronaves más antiguas de esta flota.
- La operación de las aeronaves Bell Huey II no afecta de manera directa la estructura primaria cap.
- La ubicación de la celda auxiliar es un factor agravante en cuanto a la ubicación de la rajadura, pero no es la causa principal de la ruptura, en la medida en que se presentan daños tanto en los cap derechos como en los izquierdos o en ambos lados.

- El cap posiblemente fue fabricado mediante extrusión, que sería una de las causas que propician la formación de grietas, y esto resulta de una baja velocidad de extrusión.
- Una de las posibles causas para el agrietamiento del componente estructural es la presencia de óxidos intergranulares, característica general de las aleaciones de aluminio 7075-T6 que, junto a la aplicación de un esfuerzo, lleva a generar y propagar una grieta.
- El análisis por elementos finitos, realizado a la pieza main beam caps con el software AFGROW, se basó en el material 7075-T6, según manual de reparación DMWR55-1520-210, sección 4-111, con dos modelos diferentes de grieta. Así, se puede observar a qué esfuerzo máximo está sometida la pieza, número de ciclos y número de vuelos, datos que no coincidían con el análisis estadístico elaborado anteriormente. Se decidió analizar la pieza con un material de menor calidad, el 7075-T651, y de este modo se obtuvieron los datos de esfuerzo máximo, número de ciclos y número de vuelos. Al realizar la comparación entre estos dos materiales, se puede determinar que posiblemente se está utilizando un material que no está normalizado, ya que sus porcentajes de aleantes no corresponden al solicitado por el manual de reparación del fabricante.

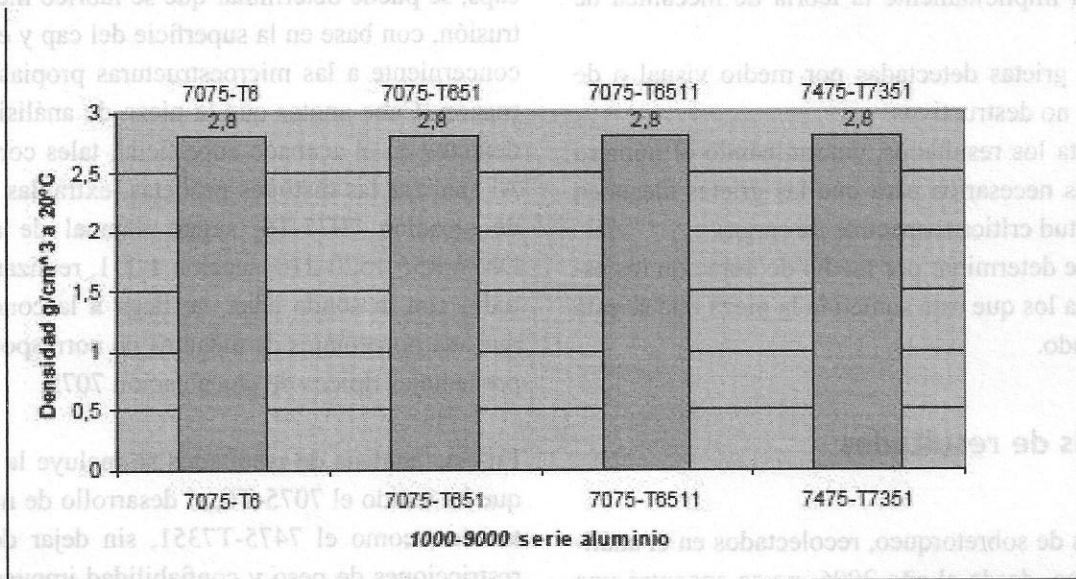


Figura 12. Densidades de las aleaciones de aluminio [2]



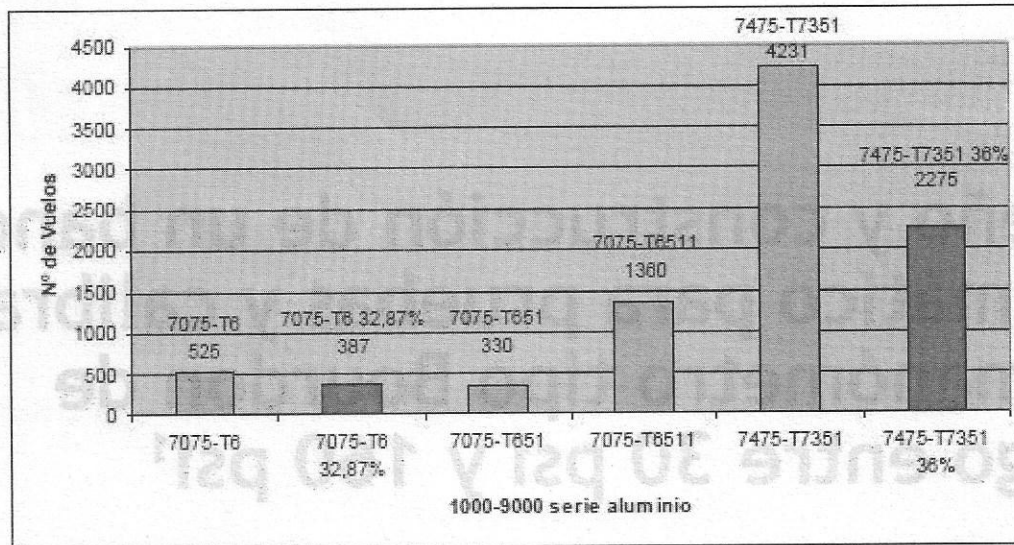


Figura 13. Resultados Afgrow, grieta simple de borde en esquina, SMF 30% HHA vs. número de vuelos

Es preciso mencionar que, aunque se estuviera manejando el material 7075-T6 normalizado, este no es recomendable para fabricar los main beam caps después de la repotenciación, pues el proceso de corrosión intragranular es excesivo debido a su composición química y precipita la falla estudiada.

- El proceso de investigación y desarrollo del capítulo de materiales y empezar a trabajar con el software Afgrow nos encaminó a analizar los materiales 7075-T6511 Y 7475-T7351 como posible reemplazo de la pieza afectada y como solución a los múltiples inconvenientes que esto origina.

## 10. Referencias

- [1] [www.wallace.com/capecanaverall](http://www.wallace.com/capecanaverall)
- [2] Committee, Asm Handbook. Handbook, volume

12: Fractography. Estados Unidos: ASM International, 1992.

- [3] M. Anglada, J. Alcalá, L. Llanes, A. Mateo y N. Salán, Núria. Fractura de materiales. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.
- [4] J. A. Harter. Afgrow users guide and technical manual, Afri-a-Wp-Tr-2008. Air Force Research Laboratory, Estados Unidos 2008.
- [5] Inter-American Air Forces Academy. Dictionary of technical terms. Estados Unidos: IAAFA, 1989.
- [6] Us Army Aviation and Troop Command, Aircraft Depot Maintenance Work Requirement Adm Uh-Ih/Ih-Iv Helicopters. DreamWorks DMWR55-1520-210, sección 4-111 y 4-112. Jul. 1984.
- [7] [www.afgrow.net/about/history.aspx](http://www.afgrow.net/about/history.aspx)