

Determinación del factor de carga límite del tren de aterrizaje de un helicóptero liviano a partir de un ensayo *limit drop test*

Claudio M. Rimoldi¹

¹CTA - Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 01/02/2019
Fecha de aceptación del manuscrito: 28/05/2019
Fecha de publicación: 15/07/2019

Resumen— Determinación del factor de carga límite, mediante información recabada en un ensayo de caída de acuerdo a lo establecido en el punto HUL.725 (*Limit Drop Test*) del estándar *Specific Airworthiness Requirements for Ultra-Light Helicopters* (HUL) y su equivalente Nacional RAAC-HML, utilizando una herramienta de procesamiento de imágenes tipo *Open Source*. Posteriormente se procedió a comparar los valores obtenidos, en ambos arcos, con los obtenidos por procedimientos básicos de cálculo y con información propuesta en documentos de referencia como la AC-27-1B Change 4, de la FAA. Para la realización del ensayo se construyó un cuerpo de prueba (*dummy*) que representaba, fidedignamente, las zonas de vinculación (geometría) de los arcos (principal y secundario) del tren del helicóptero liviano y con una masa equivalente acorde a las condiciones establecidas en el estándar de referencia.

Palabras clave—factor de carga límite, *limit drop test*, RAAC-HML, tren de aterrizaje, procesamiento de imágenes.

Abstract— Determination of the limit load factor, using information collected in a drop test according to the provisions of point HUL.725 (*Limit Drop Test*) of the *Specific Airworthiness Requirements for Ultra-Light Helicopters* (HUL) standard and its National equivalent standard RAAC-HML, using an open source image processing tool. Subsequently, we proceeded to compare the obtained values, in both landing skids, with those obtained by basic calculation procedures and with information proposed in reference documents such as AC-27-1B Change 4, of the FAA. For the realization of the test, a test body (*dummy*) was constructed, which represented, authentically, the areas of linkage (geometry) of the arcs (main and secondary) of the light helicopter landing skids and with an equivalent mass according to the conditions established in the reference standard.

Keywords— Limit load factor, limit drop test, RAAC-HML, landing gear, image processing.

INTRODUCCIÓN

El proceso de certificación de una aeronave involucra varios aspectos como los cálculos analíticos, ensayos estáticos y dinámicos, ensayos en vuelo entre otras actividades. Todos estos procesos a realizar, con el objeto de obtener un Certificado Tipo, se basan en estándares de aeronavegabilidad acordes con la categoría y tipo de aeronave y en las condiciones particulares que se acuerden con la autoridad aeronáutica competente las cuales quedan plasmadas en el documento denominado *Compliance Check List*.

En este trabajo se presentará lo considerado y desarrollado en el proceso de certificación de un helicóptero liviano para cumplir con el punto HUL.725 (*Limit Drop Test*) del estándar RAAC-HML. Este ítem particular está relacionado con la capacidad de absorción de energía por parte del tren de aterrizaje del helicóptero y, por

lo tanto, con el factor de carga límite de inercia resultante producto del impacto del tren de la aeronave con el suelo.

Finalmente por medio de la utilización de sistemas de medición de desplazamiento desarrollados específicamente para determinar la deflexión de los arcos y un programa abierto de procesamiento y análisis de imágenes, se procedió a determinar el factor de carga límite, de inercia, producto del ensayo.

ABREVIATURAS, DEFINICIONES Y ACRÓNIMOS

RAAC-HML: Reglamento de Aeronavegabilidad de la República Argentina - Helicópteros Muy Livianos.

HUL: *Specific Airworthiness Requirements for Ultra-Light Helicopters*.

LDT: *Limit Drop Test*.

CG_{ar} : centro de gravedad longitudinal, atrasado.

M_{MD} : máxima masa de despegue [kg].

W : reacción estática; fracción de M_{MD} del elemento del arco más solicitado.

$M_E = W_e$: masa efectiva [kg].

CP: cuerpo de prueba.

d : deformación vertical de los arcos, bajo M_E [m].

Dirección de contacto:

Claudio Rimoldi, calle 116 entre 47 y 48 S/N, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, 1900 La Plata. Tel: 2214236679 interno 431, crimoldi@ing.unlp.edu.ar

- h : altura de caída medida desde el punto más bajo del tren de aterrizaje hasta el suelo [m].
- d_1 : trayectoria total recorrida por el CP y el CG_{at} [m].
- v_1 : velocidad vertical de caída, antes del impacto [m/s].
- d_2 : altura alcanzada por el CP y el CG luego de impactar contra el suelo [m].
- v_2 : velocidad luego del contacto con el suelo [m/s].
- e : factor de restitución.
- v_r : velocidad de restitución [m/s].
- a_r : aceleración de restitución [m/s].
- T : duración del pulso de aceleración [seg].
- L : factor de sustentación (2/3).
- a_{max} : aceleración máxima alcanzada por el CG_{at} [m/s²].
- n : factor de carga límite de inercia.
- n_j : máximo factor de carga alcanzado durante el ensayo LDT [g's].

CONSIDERACIONES ESTABLECIDAS EN EL ESTÁNDAR Y OTROS DOCUMENTOS RELACIONADOS

En la Sección D.4 *Landig Gear*, punto HUL.725 *Limit Drop Test*, el estándar establece que para el ensayo debe considerarse una altura de caída de 330 mm medida desde el punto más bajo del tren de aterrizaje (esquíes) al suelo o bien considerarse una altura menor a la mencionada (no inferior a 203 mm) resultando en una velocidad de contacto de descenso igual a la máxima velocidad de descenso probable que ocurra al contacto con el terreno en operación de aterrizaje sin potencia. Se optó por utilizar 330 mm de altura para el ensayo.

Como el helicóptero se encuentra en descenso, en autorrotación, existe una fuerza sustentadora actuante; el estándar establece que debe considerarse 2/3 de esta fuerza en el ensayo para que sea considerando un sistema de absorción de energía o bien utilizando una M_E , se optó por esta última alternativa.

Finalmente, y referido a la condición más crítica para el tren de aterrizaje según lo requerido en el estándar, por experiencia se estableció que esa condición se obtuvo con CG_{at} y además se planteó la suposición que esta condición se corresponde con la M_{MD} .

Del ensayo se obtuvo información que permitió verificar el cumplimiento de otros puntos del estándar; en particular el presente trabajo solamente abarcará la manera en que se determinó n . Si el valor de n determinado resultara superior al factor de carga límite positivo por maniobra establecido en HUL.337 (+3,5; *limit maneuvering load factor*), todo el helicóptero debería ser analizado para el máximo factor alcanzado.

Para la determinación del factor n [2], a partir de los datos del ensayo, se consideraron las siguientes ecuaciones:

$$W_e = W * \frac{(h+(1-L)*d)}{(h+d)}, \quad (1)$$

$$n = n_j * \frac{W_e}{M_{MD}} + L. \quad (2)$$

EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL ENSAYO

- Pórtico o grúa con desacople rápido.
- Celda de carga hasta 5000 N marca FLEXAR, modelo REACCIÓN CZC500.
- Cámaras GoPro modelos HERO 4 SILVER y HERO 3+.
- Planos de referencia (no empleados en el ensayo preliminar).
- Instrumentos de medición: cinta métrica y calibre digital.
- Goniómetro digital marca: NAV-DATA Technologies - ND-81 Digital Protractor. Rango 4x90° (0-360°), resolución: 0.1°, precisión: 0° y 90° <=0.1°, el resto <=0.2°.
- Software TRACKER.

DESARROLLO DEL ENSAYO LDT

Para el ensayo se consideró una M_{MD} de 480 kg y la posición de CG_{at} como condiciones más desfavorables.

El objetivo del ensayo fue analizar la manera en que respondió el tren de aterrizaje ante el contacto con el suelo bajo determinadas condiciones dinámicas y determinar la trayectoria de puntos próximos al CG_{at} con el objeto de recabar información necesaria para calcular el factor de carga de inercia. Para cumplir el objetivo se desarrolló lo que se denominó CP el cual representaba, fidedignamente, las condiciones de los anclajes de los arcos del tren con el fuselaje. Adicionalmente permitió tomar puntos de referencia (el CP es varias órdenes de magnitud más rígido que el tren) para la evaluación de desplazamientos finales de cada uno de los arcos respecto a puntos fijos o rígidos sobre la estructura del CP. Otra función importante fue la de permitir acumular masa en los habitáculos y distribuirla con el fin de alcanzar W_e y la posición CG_{at} . En la Figura 1 se presenta una vista lateral del CP y en la Figura 2 una fotografía del CP y los dispositivos de medición de deformación.

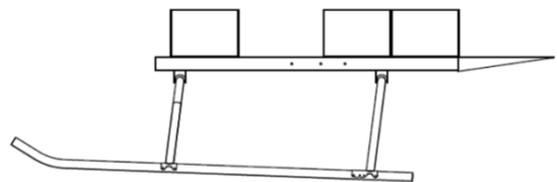


Fig. 1: CP vista lateral del esquema.

Para la determinación del valor de W_e se utilizó la ecuación (2) basada en el documento de referencia [1] (Milwitzky y Lindquist, 1951) y se desarrollaron dos sistemas mecánicos (telescopícos) para la medición de los desplazamientos del centro de cada uno de los arcos. Estos sistemas se instalaron en la zona central de cada arco (delantero y trasero). Bajo condiciones estáticas de carga (como se estableció al principio de esta sección) permitieron determinar los desplazamientos de cada arco y los máximos desplazamientos alcanzados por ellos luego

del ensayo LDT. Para la medición de la masa se utilizó una celda de carga electrónica.



Fig. 2: CP utilizado en el ensayo LDT.

El elemento más solicitado es el arco trasero que tomó (en condiciones estáticas) el 70% de M_{MD} . Con los valores medidos se determinó el valor de:

$$W_e = 325 \text{ kg} .$$

Luego, para el ensayo, se consideró una masa superior W_e o M_E de 339 kg, condición conservativa. Se instalaron bolsas de arena en los habitáculos del CP hasta alcanzar M_E . Bajo esta condición estática (deformación estática del tren) se regularon los sistemas de medición de desplazamientos mencionados anteriormente tomando las medidas iniciales de cada uno de ellos.

Con las condiciones de ensayo establecidas se procedió a instalar marcas de referencia sobre la parte delantera y trasera del CP. Para realizar el seguimiento de estos puntos durante el ensayo LDT se utilizaron cámaras tipo *Action Cam* a las cuales se les reguló la velocidad de filmación (cuadros por segundo).

Ubicadas las cámaras se elevó el CP, izándolo desde el CG_{at} , hasta que el punto más bajo de cada esquí estuviera a 330 mm respecto al suelo, finalmente se niveló el CP.

Mediante un dispositivo de desacople rápido se dejó caer libremente el CP y se grabó la caída utilizando las cámaras mencionadas; posteriormente se procedió a analizar la filmación con un programa de procesamiento de imágenes tipo *Open Source* con el objeto de determinar las trayectorias de los puntos de referencia.

Finalmente se midieron las distancias finales de cada sistema telescópico, la diferencia entre la medida original y la final establecieron los desplazamientos máximos alcanzados por cada uno de los arcos. Los valores obtenidos permitieron verificar los desplazamientos obtenidos mediante el procesamiento de imágenes.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO, MÉTODO ANALÍTICO Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Se analizaron los resultados obtenidos en el ensayo LDT mediante cálculo analítico y por procesamiento de imágenes (*software TRACKER, open source*)

combinándolo con conceptos físicos a fin de determinar el factor n para las condiciones establecidas anteriormente.

El cálculo analítico consistió en estudiar el fenómeno como una caída libre asumiendo un coeficiente de restitución dado por la elasticidad del sistema compuesto por los arcos del tren y sus esquís.

Partiendo de la condición de un cuerpo en caída libre, en condiciones ideales, y basándose en los lineamientos generales de la referencia [3], se desarrolló lo que se expone a continuación. La velocidad inmediatamente antes del contacto de los esquís con el suelo viene dada por ecuación (3)

$$v_1 = -\sqrt{2 * g * h} . \quad (3)$$

Considerando que la deformación del sistema elástico del tren, al estar elevado el CP, es despreciable, y siendo h la altura especificada por el estándar y empleada en el ensayo, de la ecuación (3) se obtiene una velocidad de caída de 2,54 m/s (equivalente a 8,34 fps) un instante antes que toquen los esquís con el suelo; la referencia [2] establece una velocidad mínima de 8 fps.

Al momento del contacto con el suelo el tren comenzó a deformarse absorbiendo energía elástica y disipó energía por deformación plástica y fricción. Al liberarse la energía absorbida se tuvo una restitución del sistema elevándose el CP hasta alcanzar d_2 , con este dato y por medio de la ecuación (4) fue factible establecer la velocidad luego de impactar con el suelo.

$$v_2 = \sqrt{2 * g * d_2} . \quad (4)$$

Las velocidades determinadas de esta manera son velocidades medias. En la Figura 3 se presenta un esquema de lo explicado.

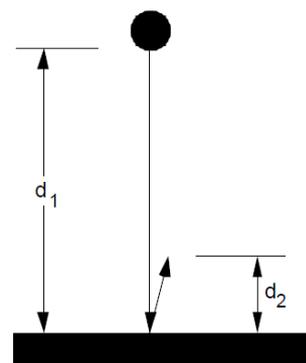


Fig. 3: Esquema del sistema antes y después del impacto.

Considerando que el pico de aceleración tiene la forma de una función medio seno como la presentada en la Figura 4.

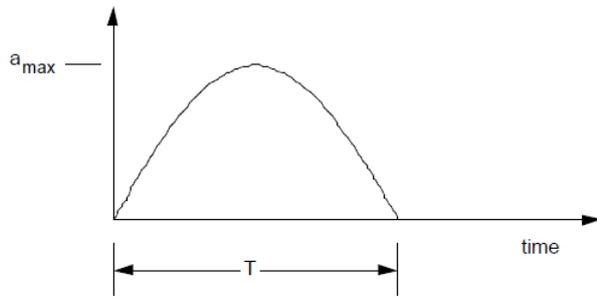


Fig. 4: Función medio seno.

Por integración de la función anterior se obtiene una función medio coseno resultando en una variación de la velocidad como la mostrada en la Figura 5.

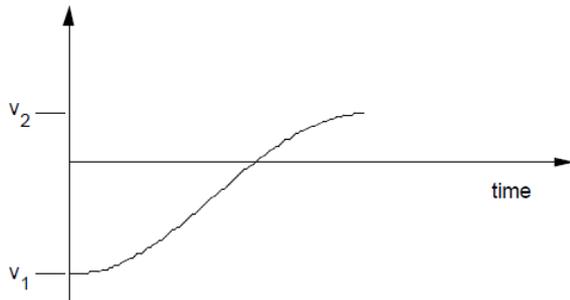


Fig. 5: Variación de la velocidad.

Conocidas las condiciones de contorno (velocidades antes y después del impacto), la variación de la velocidad, en el tiempo, se representa por la ecuación (5).

$$v(t) = \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right) * \left(\frac{v_1 - v_2}{2}\right) + \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (5)$$

Por derivación de la ecuación (5) y considerando las condiciones de contorno, se obtuvo la aceleración.

$$a(t) = \frac{\pi}{T} * \text{sen}\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right) * \left(\frac{v_1 - v_2}{2}\right). \quad (6)$$

Considerando que el pico máximo de aceleración se alcanza en $T/2$, reemplazando las expresiones (3) y (4) en la ecuación (6) y asumiendo que la trayectoria total del CG es d_1 , la aceleración máxima está expresada por la ecuación (7).

$$a_{max} = \frac{\pi}{T} * \sqrt{\frac{g}{2}} * (\sqrt{d_2} + \sqrt{d_1}). \quad (7)$$

Asumiendo que el CP es un cuerpo rígido, como fue planteado anteriormente, el movimiento vertical del CG_{at} será el mismo que el del CP.

La altura del CG_{at} , antes del ensayo LDT, hasta el piso se compuso por la suma de la altura del CG_{at} hasta los patines (720 mm) más h , total 1050 mm.

Posteriormente al ensayo LDT se determinaron los desplazamientos o compresiones experimentadas por cada

uno de los sistemas de desplazamientos ubicados en los arcos trasero y delantero.

El arco posterior (cercano al CG_{at}) llegó a la máxima posición inferior, alcanzando la velocidad vertical cero, con lo cual la trayectoria total recorrida fue d_1 .

Medida la altura de rebote d_2 , el ancho de pulso del impacto y utilizando la ecuación (7) se determinó a_{max} cuyo valor fue del orden de los 26 m/s².

El valor de n_j se obtuvo sumándole al valor anterior la aceleración de la gravedad y dividiendo el valor resultante por ésta última o, lo que es lo mismo, lo expresado en la ecuación (8).

$$n_j = \frac{a_{max}}{g} + 1. \quad (8)$$

El valor de n se calculó a partir de las ecuaciones (2) y (8) para los valores de M_E y M_{MD} resultando un valor del orden de 3.

El cálculo de n utilizando procesamiento de imágenes se basó en utilizar el programa TRACKER el cual permite evaluar, cuadro a cuadro, una secuencia de película y determinar la trayectoria de un punto o puntos de referencia en función del tiempo.

Para la utilización del *software*, inicialmente, se realizaron calibraciones utilizando elementos simples que tuvieran condiciones de velocidad semejante a las del CP utilizado en el ensayo. De esta manera se estableció la más óptima velocidad de filmación de las cámaras utilizadas en combinación con una buena resolución de imagen.

Como fue mencionado, sobre el CP y en las cercanías del CG_{at} , se ubicaron puntos de referencia con buen contraste para que sean seguidos por el *software*.

Para que los resultados obtenidos por el procesamiento de imágenes con el *software* representaran los valores reales de desplazamiento, se calibró este tomando longitudes de referencia contenidas en el mismo plano del punto al que se le realizó el seguimiento.

Para el ensayo LDT, análisis del arco posterior (más crítico), se calibraron las cámaras a una velocidad de 60 cuadros por segundo, la misma velocidad de filmación y resolución se utilizó para el arco delantero.

La Figura 6 presenta una imagen del CP en el momento del contacto con el suelo, puede observarse (círculos rojos verticales) la trayectoria del punto de referencia. En la Figura 7 se presenta una imagen de la trayectoria completa del punto de referencia en función del tiempo, obtenida con el *software*.

Analizando la curva de la Figura 7 se determinó el intervalo de tiempo para el cual la velocidad vertical toma el valor cero. Conocida V_1 se determinó la aceleración producto de la variación de la velocidad (disminución) por la deformación del tren de aterrizaje. La aceleración media se determinó mediante la ecuación (9).

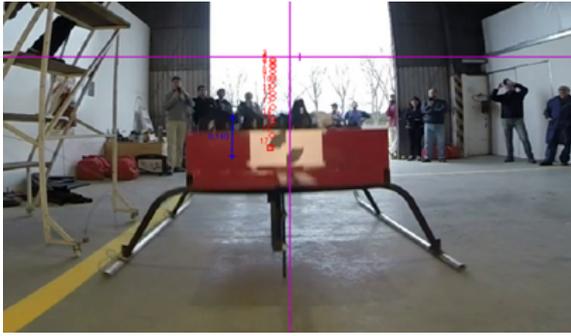


Fig. 6: CP luego de ser soltado y en contacto con el suelo.

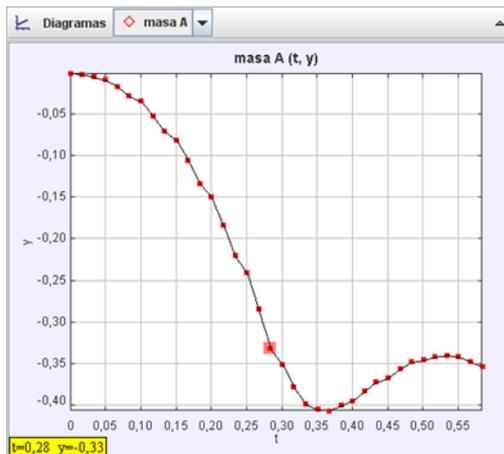


Fig. 7: Trayectoria del punto de referencia próximo al CG_m .

$$a_c = \frac{(v_f - (-v_1))}{(t_f - t_i)} \quad (9)$$

Resultando un valor de aceleración media del orden de los 25 m/s^2 , valor inferior al determinado anteriormente, como era de esperar.

Los valores de n_j y n se obtuvieron con las ecuaciones (8) y (2), resultando en un factor de carga n aproximadamente del orden de 3.

La presentación anterior corresponde a lo experimentado por el arco posterior del tren de aterrizaje del helicóptero, de la misma manera se procedió para el arco delantero del tren.

Finalmente, luego de alcanzar el máximo factor de carga, toda la energía acumulada por deformación elástica en los arcos fue utilizada para elevar el CP hasta una determinada altura, parte de la energía total fue disipada en fricción contra el piso y en deformación plástica de los arcos y otros elementos que componen el tren.

CONCLUSIONES

Con el equipamiento utilizado, elementos y equipos convencionales, y con la ayuda de un *software* de procesamiento o análisis de imágenes, se pudo obtener el factor de carga límite de inercia producto del ensayo LDT.

El resultado obtenido con el procesamiento de imágenes no difiere, substancialmente, con el obtenido con el método analítico. Ambos procedimientos presentan resultados

semejantes. Por otra parte la referencia [4] establece que, para este tipo de trenes de aterrizajes, es de esperar factores de carga límite de inercia del orden de los obtenidos.

Es de resaltar que el ensayo fue realizado con una M_E superior a la calculada (condición conservativa) con lo cual sería de esperar que el factor n calculado con una masa M_E inferior resultase en un factor n menor.

Con el ensayo LDT realizado y los factores obtenidos se cumplió con el punto HUL.725 y otros puntos del estándar que estaban relacionados con este ensayo como, por ejemplo, que factor de carga de inercia obtenido sea inferior al valor especificado como factor de carga límite positivo.

Esto significó que todos los cálculos estructurales del helicóptero se realizaron con un factor de $+3,5$, factor de carga límite positivo por maniobra.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa Cicaré S.A. por haberme permitido exponer, en el CAIA 5, lo realizado en este ensayo.

REFERENCIAS

- [1] Miltwitzky, B. y Linquidquist D. (1951), "Evaluation of the reduced-mass method of representing wing-lift effects in free-fall drop tests of landing gears", Langley Field, NACA.
- [2] Department of Transportation, FAA (2014), CFR - Federal Aviation Regulation - Part 27 - 27.725 d.
- [3] Endevo (2009), Acceleration levels of dropped objects.
- [4] Department of Transportation, FAA (2014), CFR - Federal Aviation Regulation - AC-27-1 B Change 4.