

# ANÁLISIS DE RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL ESTABILIZADOR HORIZONTAL DE LA AERONAVE IA-100B MEDIANTE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS Y ENSAYOS EXPERIMENTALES

M. Vianello<sup>a</sup>, W. Mendez<sup>a</sup> y A. Liberatto<sup>b</sup>

<sup>a</sup>FAdA – Gerencia de Ingeniería

Av. Fuerza Aérea Argentina 5500 - Córdoba - Argentina

<sup>b</sup> Departamento de Mecánica Aeronáutica - Instituto Universitario Aeronáutico

Av. Fuerza Aérea Argentina 6500- Córdoba - Argentina

Email: vianello@fadeasa.com.ar

## RESUMEN

*En este trabajo se presenta el análisis estructural del estabilizador horizontal de la aeronave IA-100 B/C. El objetivo del análisis es evaluar la capacidad de la estructura primaria del estabilizador para soportar diferentes condiciones de carga, de acuerdo con las especificaciones estándar ASTM F3116 y ASTM F3114. Para ello se utiliza un proceso de modelado mecánico con herramientas de simulación numérica, y para contrastar los resultados de cálculo, se realizan ensayos experimentales. Los resultados de las pruebas físicas indican que el estabilizador responde de manera lineal, elástica y repetitiva, y que las curvas carga-desplazamiento se ajustan a las estimaciones realizadas por cálculo, hasta un nivel de carga correspondiente a Carga Límite. Además, el conjunto mantiene su integridad estructural hasta un nivel de carga correspondiente a Carga Última, fallando por encima de este nivel de carga. Así, el trabajo proporciona información que permite retroalimentar el diseño, los métodos de análisis y los procesos de fabricación y armado de la estructura de la aeronave.*

**Palabras clave:** Materiales Compuestos, FEM, Diseño, ANSYS

## INTRODUCCIÓN

En el proceso de diseño de aeronaves se suele dividir a ésta en distintos conjuntos (ala, fuselaje, empenaje horizontal, empenaje vertical, superficies de control, etc.) para organizar de manera más eficiente las tareas intrínsecas del proceso de diseño. Todos estos grupos tienen algunas particularidades, pero a grandes rasgos el proceso de diseño implica:

- Conceptualización de la estructura entendiendo como se quiere que esta funcione (que componente va a tomar cada una de las cargas que actúan sobre la estructura).
- Validación pensando en el proceso de fabricación, armado y mantenimiento
- Análisis de la estructura para corroborar que esta sea capaz de soportar las cargas a las que va a ser sometida durante su vida útil. Con esta información se retroalimenta el diseño hasta que converja a una solución que cumpla con los criterios de falla (Ver Ref. 1), se pueda fabricar y mantener.
- Fabricar el componente analizado previamente y ensayarlo para corroborar que la respuesta de este se asemeje a lo que fue conceptualizado en un inicio. El último paso necesario para cerrar el diseño y muchas veces cumplir con la normativa que regula el diseño de aeronaves.

Para el caso particular del empenaje horizontal de la Aeronave IA-100 B/C se partió de un concepto de estabilizador partido, en el que un tubo metálico de sección circular atraviesa el fuselaje (a la altura del larguero posterior del estabilizador) empotrando cada semi-empenaje a los lados del mismo. Un "pin" en la costilla raíz, posicionado en la vecindad del larguero anterior y orientado transversalmente (dirección Y), impide la rotación de cada semi-empenaje (alrededor del eje Y).

Las cargas por corte son transferidas al fuselaje principalmente por el tubo de sección circular, mientras que la flexión es absorbida por el propio tubo, sin transferir momentos al fuselaje. El momento torsor es resistido por el recubrimiento del estabilizador y equilibrado por el sistema de fuerzas de reacción que se producen en el tubo y en los pines anteriores (ver. Ref. 2).

Esta arquitectura conduce a semi-empenajes muy ligeros, fáciles de manipular y ensamblar, además de prácticamente no afectar la integridad estructural del fuselaje.

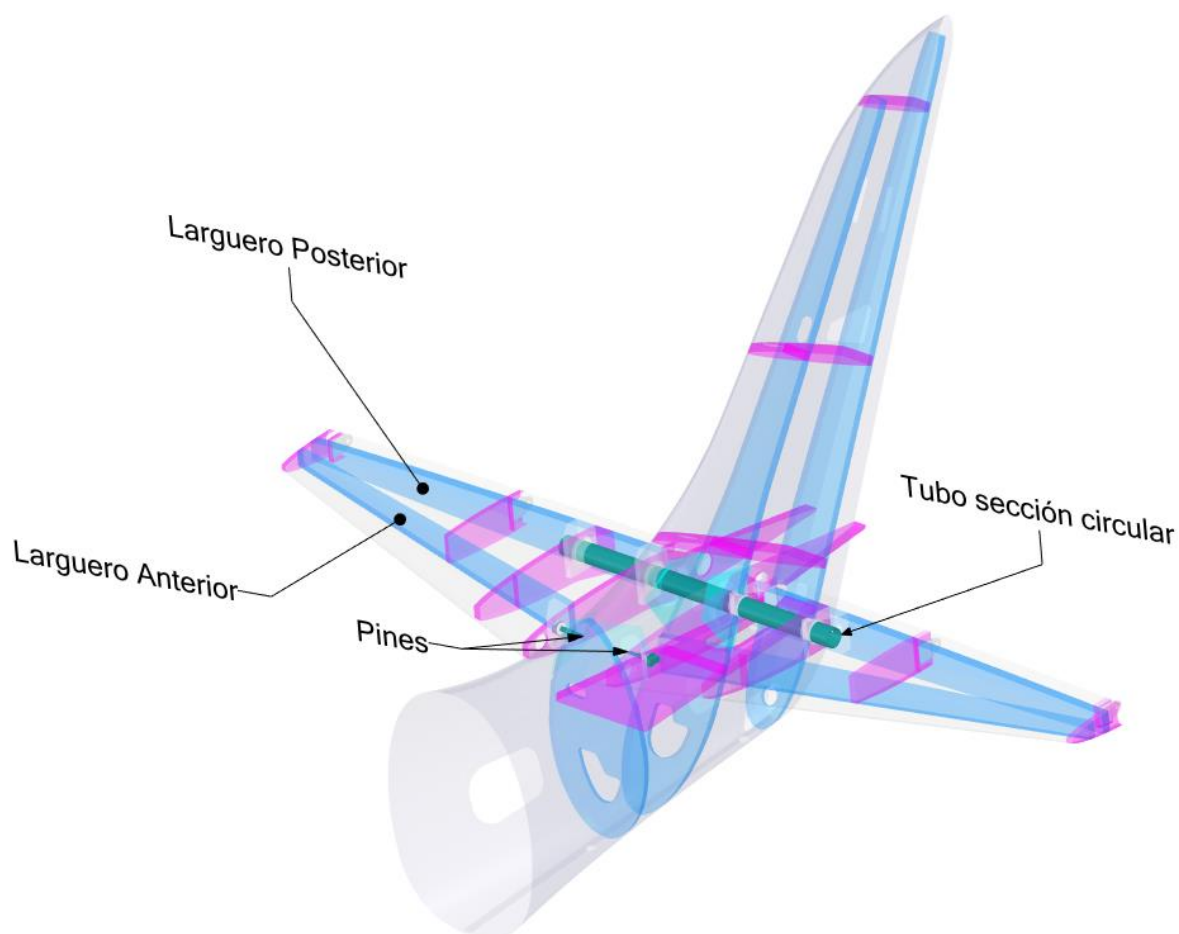


FIGURA 1 – COQUIS DESCRIPTIVO DE LA PROPUESTA DE UNIÓN

Para el análisis estructural se siguen los lineamientos establecidos en el informe técnico de la Ref. 1 en donde se establecen criterios de resistencia estática, rigidez y se mencionan algunas buenas prácticas que deben ser utilizadas para evitar problemas de durabilidad en un futuro. Para corroborar el cumplimiento de los puntos establecidos en este documento se realizó un modelo de elementos finitos mediante la utilización de un Software comercial ANSYS 2020 R2 utilizando para la verificación los casos de carga establecidos en el IT de la Ref. 3.

Para cerrar el diseño y validar todo el proceso de diseño y cálculo se realizó un ensayo del empenaje horizontal replicando durante este las condiciones de carga dimensionantes a flexión y corte (Caso H07) y a torsión (Caso H03) y se corroboró la correspondencia de resultados entre el ensayo y el modelo de elementos finitos.

## METODOLOGÍA

Este trabajo se centra en explicar el proceso de modelado y análisis estructural del empenaje horizontal de la aeronave IA-100 B/C y en el diseño del ensayo que se realizó para conocer la respuesta de la estructura.

Cabe aclarar que para el diseño de este componente estructural se utilizó un modelo de elementos finitos distinto al utilizado para comparar los resultados con el ensayo experimental. La principal diferencia entre estos modelos es la forma en la que se aplicaron las cargas ya que durante la prueba física las cargas se aplican sobre “cunas” posicionadas en coordenadas previamente definidas para tratar de asemejar las condiciones de carga durante el vuelo. Esta forma de cargar la estructura es más

exigente para la misma ya que se trata de cargas puntuales y no una distribución de presiones (Ver informe técnico Ref. 4). En la FIGURA 2 se comparan las posiciones donde son relevadas las cargas aerodinámicas, los puntos donde se aplicarían estas en el modelo utilizado para verificar la estructura y la posición de las cunus para los dos casos de carga ensayados.

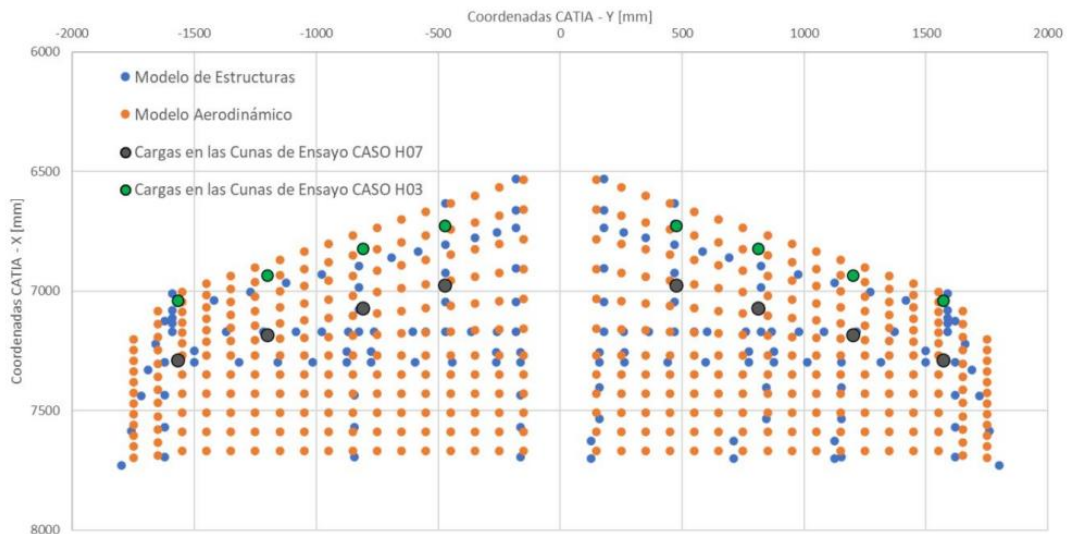


FIGURA 2 - CARGAS PARA ENSAYO ESTRUCTURAL DE ALA Y EMPENAJE HORIZONTAL.

Para acotar el alcance del trabajo se trabaja únicamente el modelo que tiene correspondencia con el ensayo para que la comparación de resultados tenga validez.

### Modelo de elementos finitos

Para armar el modelo de elementos finitos se parte de la geometría del empenaje horizontal la cual ya tuvo varios de los loops que se mencionaron anteriormente donde se corroboraba la factibilidad estructural, de fabricación y armado.

Este modelo debe ser simplificado y preparado específicamente para el análisis estructural, este proceso implica el cortar la geometría para a posterior crear contactos entre piezas aledañas, se quitan detalles que no aportan al modelo, etc. En la FIGURA 3 se muestra la geometría de detalle del estabilizador horizontal completo.

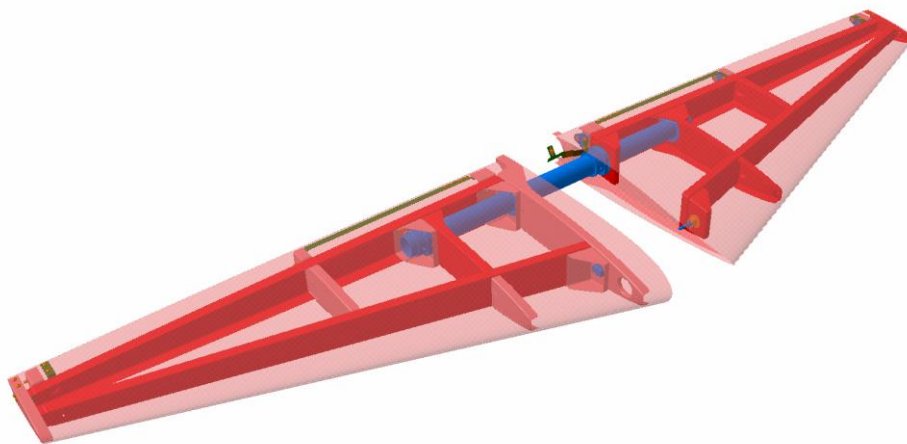


FIGURA 3 – GEOMETÍA DETALLADA DEL EMPENAJE HORIZONTAL.

Dado que solo se ensaya el semi-estabilizador izquierdo el modelo simplificado solo lo incluye a este. Además, se agregan las cunas en las posiciones previamente establecidas durante el análisis de carga, estas coordenadas se muestran en el IT de la Ref. 4.

Se puede observar que cada una de estas cunas se apoya sobre una “parte fuerte” de la estructura, es decir en zonas donde hay una costilla. Como en el modelo hay solo 4 costillas estructurales se agrega una quinta costilla de espuma para distribuir la carga de manera más suave y para evitar que el recubrimiento colapse, se elige espuma ya que no se considera estructural.

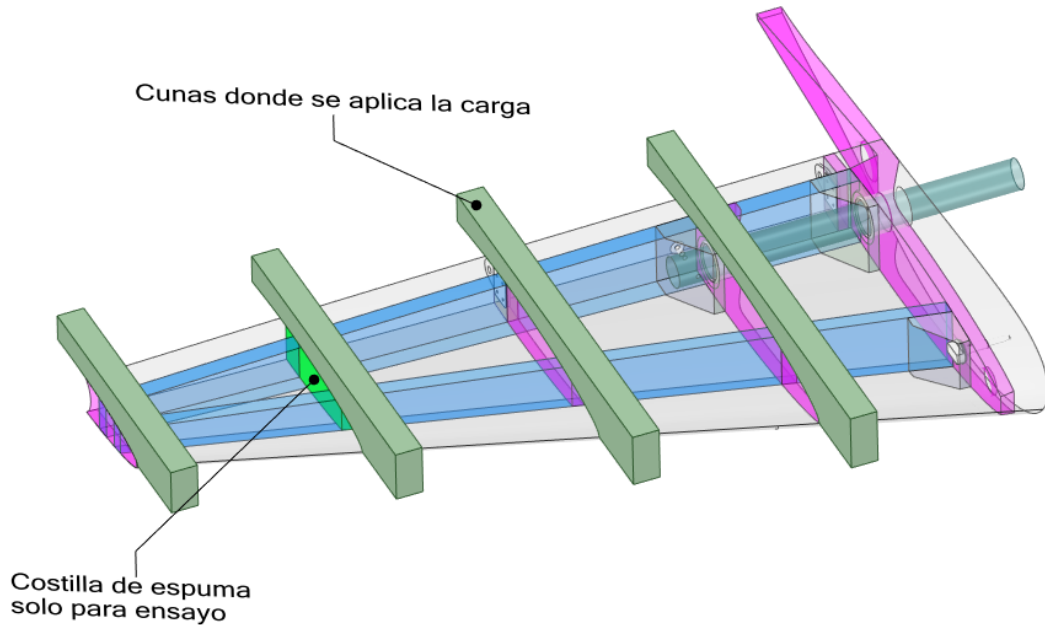


FIGURA 4 – GEOMETÍA SIMPLIFICADA DEL EMPENAJE HORIZONTAL.

Una vez simplificada la geometría se generan los contactos respectivos entre piezas de la estructura, para ello se utilizan contactos lineales del tipo “bonded” con una formulación de penalidad pura y comportamiento asimétrico. En la FIGURA 5 se muestra a modo de ejemplo la zona que se considera en contacto entre la estructura interna y el recubrimiento superior del empenaje horizontal.

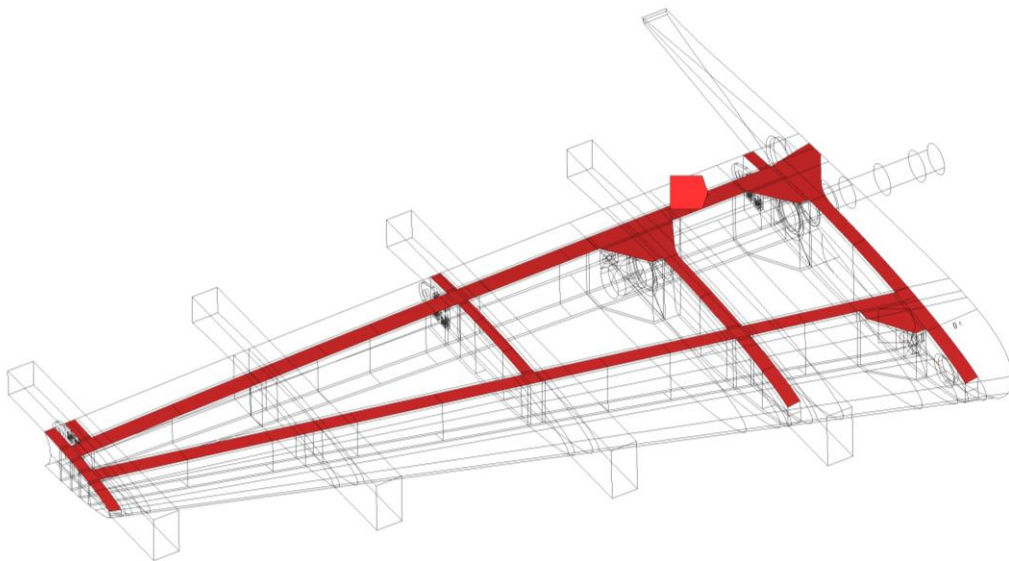


FIGURA 5 – ZONA DE CONTACTOS ENTRE ESTRUCTURA INTERNA Y RECUBRIMIENTO SUPERIOR.

La malla del modelo está conformada principalmente por elementos del tipo “Shell” lineales de 3 y 4 nodos ya que el modelo en su mayoría se realizó a partir de superficies (recubrimientos, costillas, largueros, cazoletas, etc.). Para las cunas y algunos elementos como herrajes y pines del modelo se usaron elementos sólidos de 10 y 20 nodos (Tet10 y Hex20). Esto da como resultado una malla de 38K de elementos y 59K nodos.

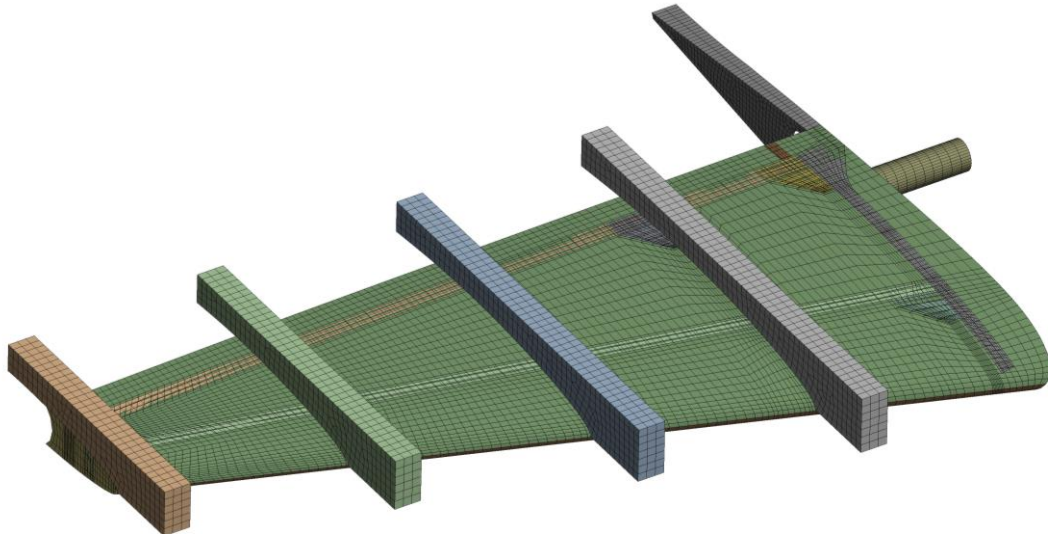


FIGURA 6 – MALLA DEL MODELO DE EMPENAJE HORIZONTAL PARA ENSAYO.

Las cargas se aplican sobre las cunas y la magnitud de estas depende del caso de carga que se esté analizando. En la FIGURA 7 se muestra la numeración de las cunas que luego, en la TABLA 1, se va a utilizar para entender cuáles son las fuerzas aplicadas en cada una de estas para replicar las condiciones de ensayo.

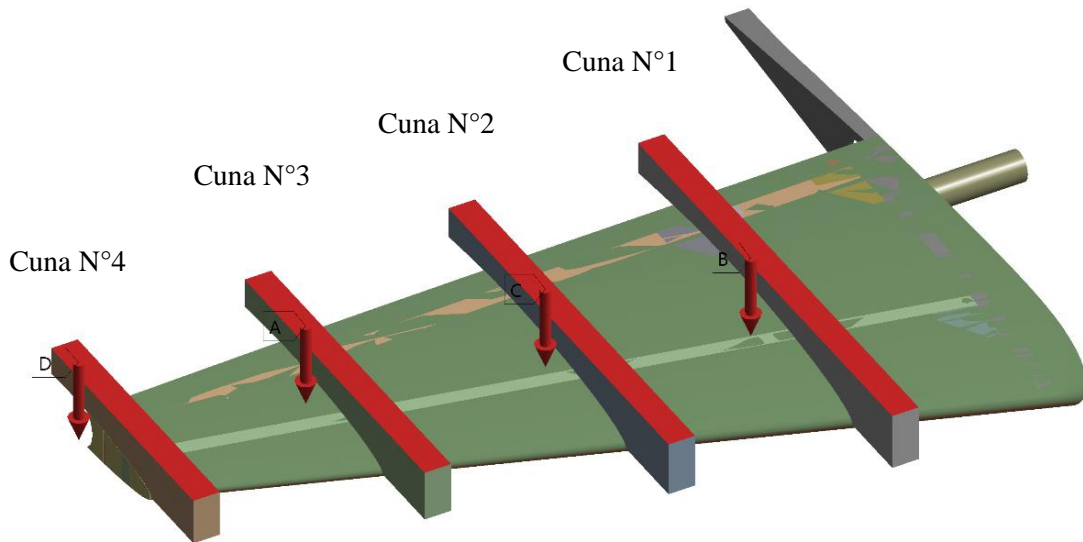


FIGURA 7 – NUMERACIÓN DE CUNAS PARA ENSAYO.

Caso de Carga	Fuerza Fz [N] - Carga Límite			
	Cuna N° 1	Cuna N° 2	Cuna N° 3	Cuna N° 4
H03	-1039	-703	-690	-476
H07	-1158	-1280	-1227	-857

TABLA 1 – CARGAS APLICADAS EN LAS CUNAS

Para ser consistentes con lo que sucede verdaderamente en el ensayo las condiciones de borde impuestas en el modelo impide que el pin frontal se mueva en direcciones XY local (se deja libre el desplazamiento en Z). Además, se restringe el desplazamiento del tubo en direcciones XYZ usando contactos lineales únicamente en la zona donde el tubo se apoyaría contra el respectivo buje cuando se solicita la estructura (Ver FIGURA 8).

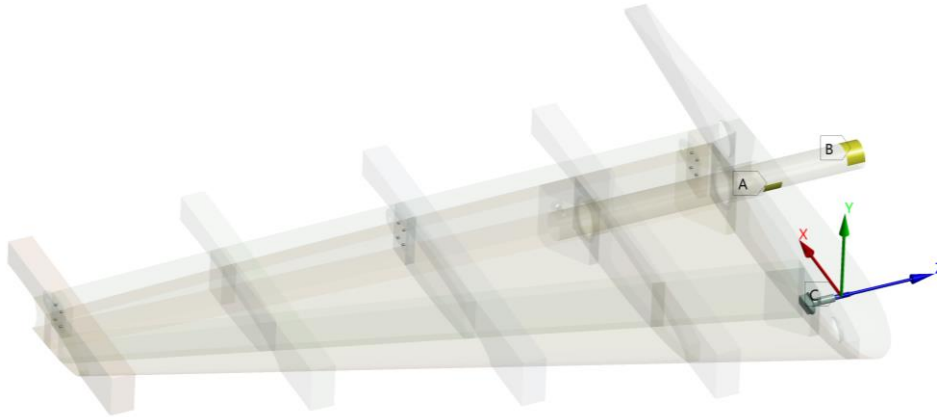


FIGURA 8 – CONDICIONES DE BORDE DEL MODELO

Una gran parte de la estructura del empenaje se fabrica a partir de láminas de fibra de vidrio pre-impregnada con resina epoxi. Las únicas partes que no son de material compuesto son los herrajes y pines los cuales son de Aluminio 2024 y el tubo posterior que vincula ambos semi-elevadores que es de Acero AISI 4130.

En la FIGURA 9 se muestra de manera cualitativa la distribución de espesores en un recubrimiento del semi-elevador izquierdo. Se puede notar que los paneles más grandes son más gruesos, esto es por la presencia de núcleos de Honeycom necesarios para estabilizar dichos paneles.

Las cunas se modelaron utilizando propiedades mecánicas de una madera genérica cargada en la librería de materiales de ANSYS (comportamiento isótropo  $E=3,16$  GPa y  $\mu=0,35$ ) ya que el análisis no está centrado en la respuesta de las mismas.

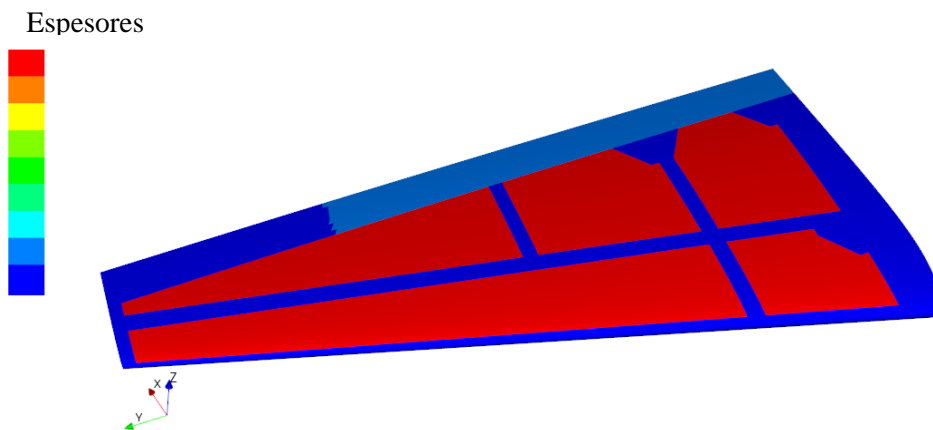


FIGURA 9 – DISTRIBUCION CUALITATIVA DE ESPESORES DEL EMPENAJE HORIZONTAL

**Ensayo experimental**

El dispositivo de ensayo del empenaje horizontal, es a grandes rasgos un arreglo de puntos de sujeción sobre cunas y barras que permite aplicar las fuerzas de los dos casos de carga H03 y H07 con un mismo montaje experimental; requiriendo solamente cambio de configuración simple para pasar de uno a otro.

Los elementos del montaje de ensayo estructural del Estabilizador se dimensionaron considerando el empleo de tubos redondos de acero AISI-SAE 1020. Dependiendo del nivel en el árbol se pueden emplear tubos con dimensiones 1 3/8 - 0,065" a 2 1/4 - 0,12".

En la FIGURA 10 se muestran las dimensiones aproximadas del dispositivo encargado de distribuir las cargas, además en esta imagen se pueden ver posiciones de los puntos de conexión, materiales y dimensiones preliminares de los elementos que conforman el árbol de carga.

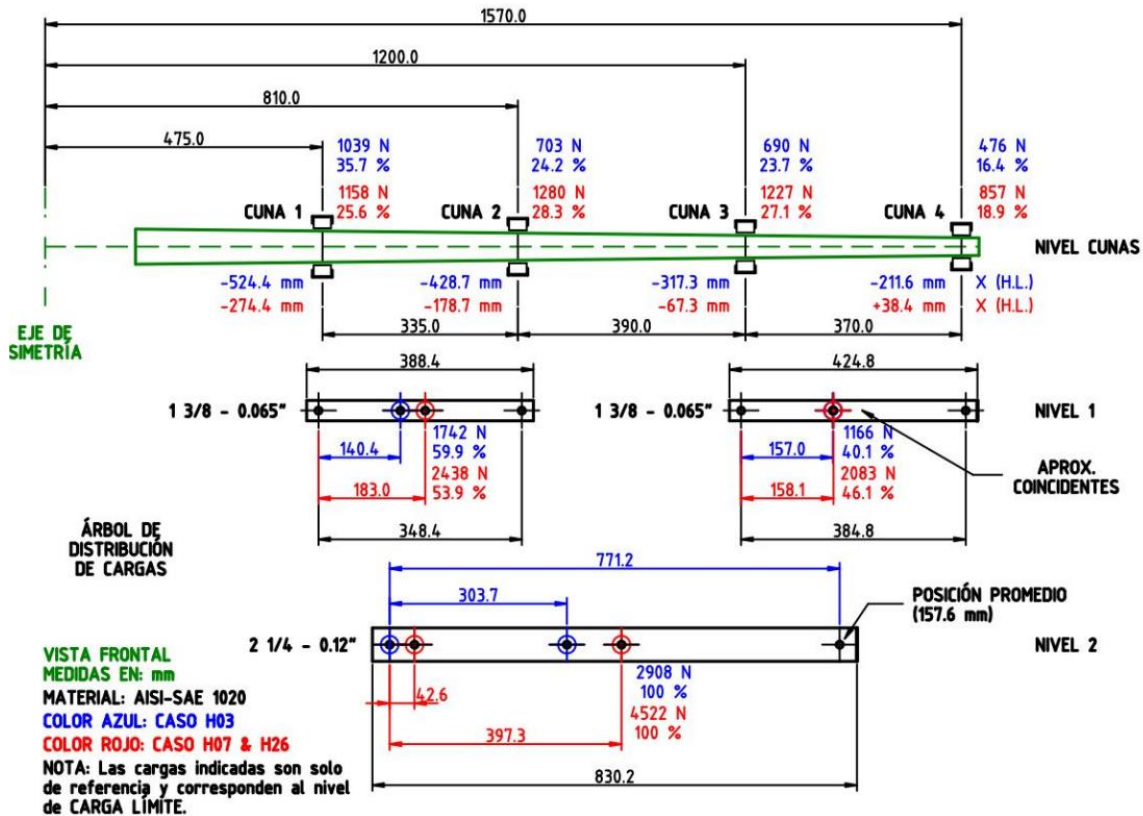


FIGURA 10 – DIMENSIONES APROXIMADAS DEL DISPOSITIVO DISTRIBUIDOR DE CARGAS.

A los esquemas de ensayo también añaden arbolados secundarios (en la parte superior), con el propósito de compensar las masas añadidas desde los arreglos de barras distribuidoras de cargas. Los mismos se plantean en forma conceptual y no se realiza ningún tipo de análisis sobre ellos. En la FIGURA 11 se muestran las demisiones aproximadas del arbolado de compensación de masas.

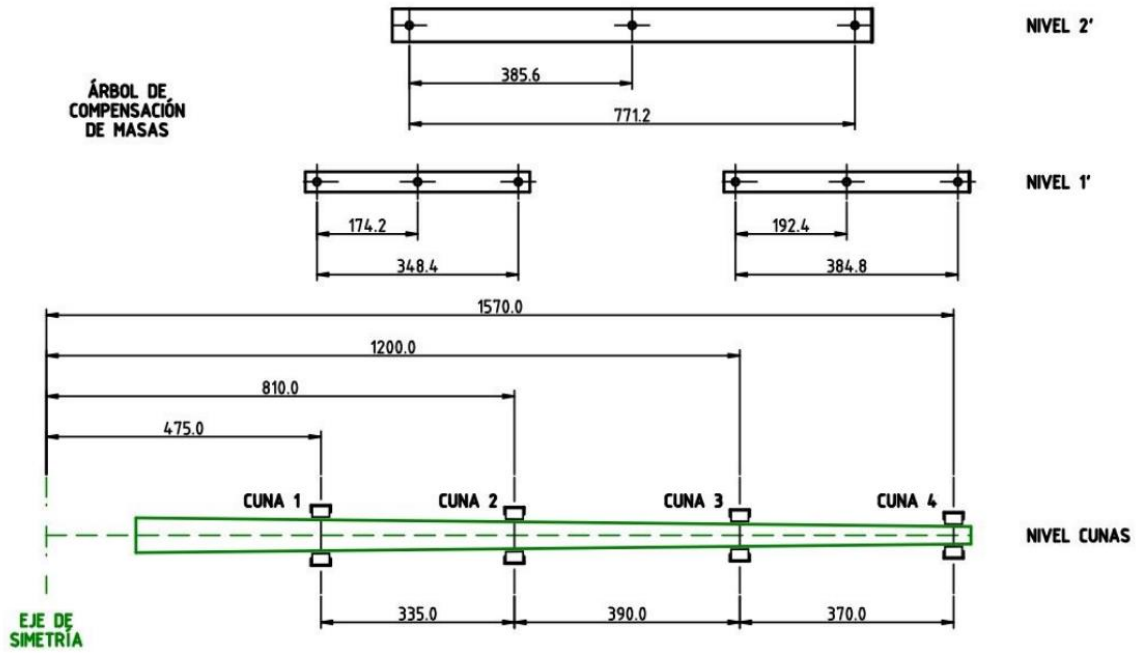


FIGURA 11 – DIMENSIONES APROXIMADAS DEL ARBOLADO DE COMPENSACIÓN DE MASAS.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del modelo de elementos finitos fue posible obtener el campo de desplazamientos en dirección Z global para los distintos casos de carga. En la FIGURA 12 se muestran algunos resultados particulares tomados en la zona de unión de las cunas para el caso de carga H03 a carga límite (J=1), estos puntos corresponden con las zonas donde se colocaron los sensores para relevar desplazamientos durante el ensayo de laboratorio.

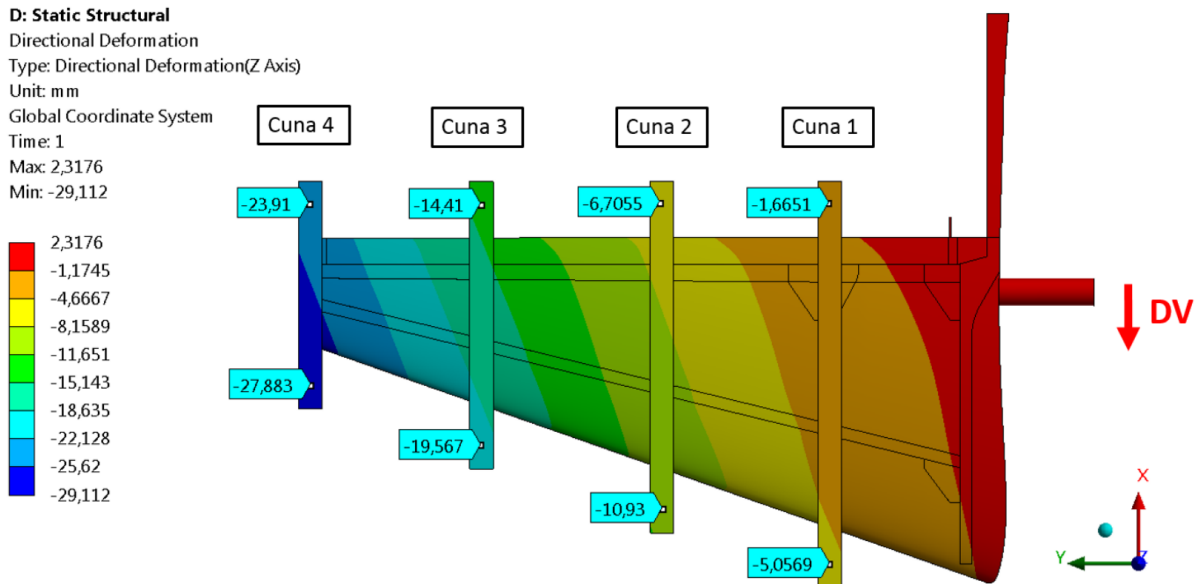


FIGURA 12 - DESPLAZAMIENTOS EN DIRECCIÓN Z EN CASO DE CARGA H03 A CARGA LÍMITE – SENSORES EN ELEMENTOS DE UNIÓN.



En el gráfico de la FIGURA 13 se comparan los resultados obtenidos para diferentes factores de seguridad ( $j$ ) durante el ensayo y se contrastan contra los obtenidos del modelo de elementos finitos. En este se puede ver que existe un buen ajuste con las estimaciones realizadas por cálculo. Las deformaciones que se muestran en la imagen corresponden con las que se midieron en cada cuna a la altura del larguero posterior.

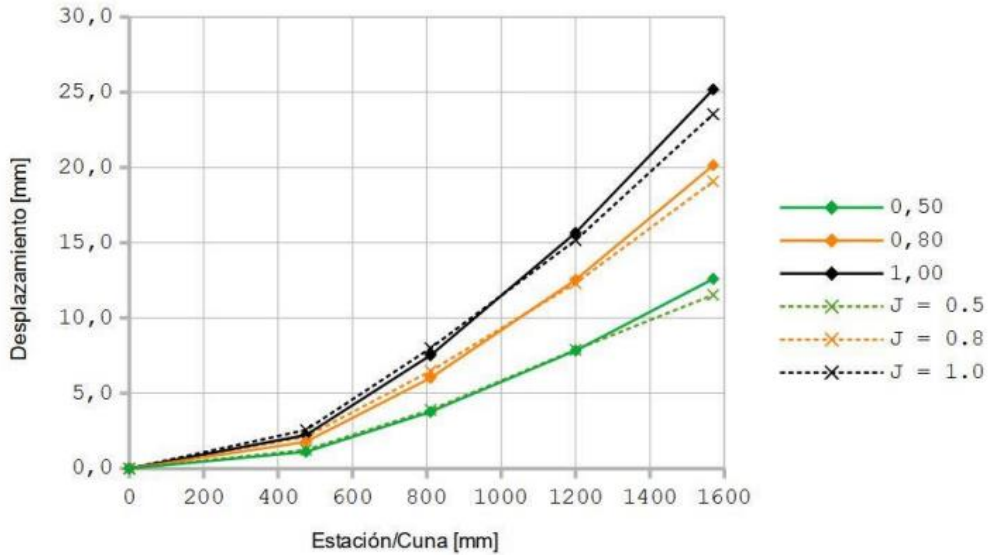


FIGURA 13 - CASO H03: DESPLAZAMIENTOS A LO LARGO DE LA SEMI-ENVERGADURA DEL ESTABILIZADOR HORIZONTAL.

De manera similar en la FIGURA 14 se muestra el campo de desplazamiento en dirección Z para el caso de carga H07 a  $j=1$  (Carga Límite). Se marcan algunos resultados particulares en la zona donde van a estar dispuestos los sensores durante el ensayo.

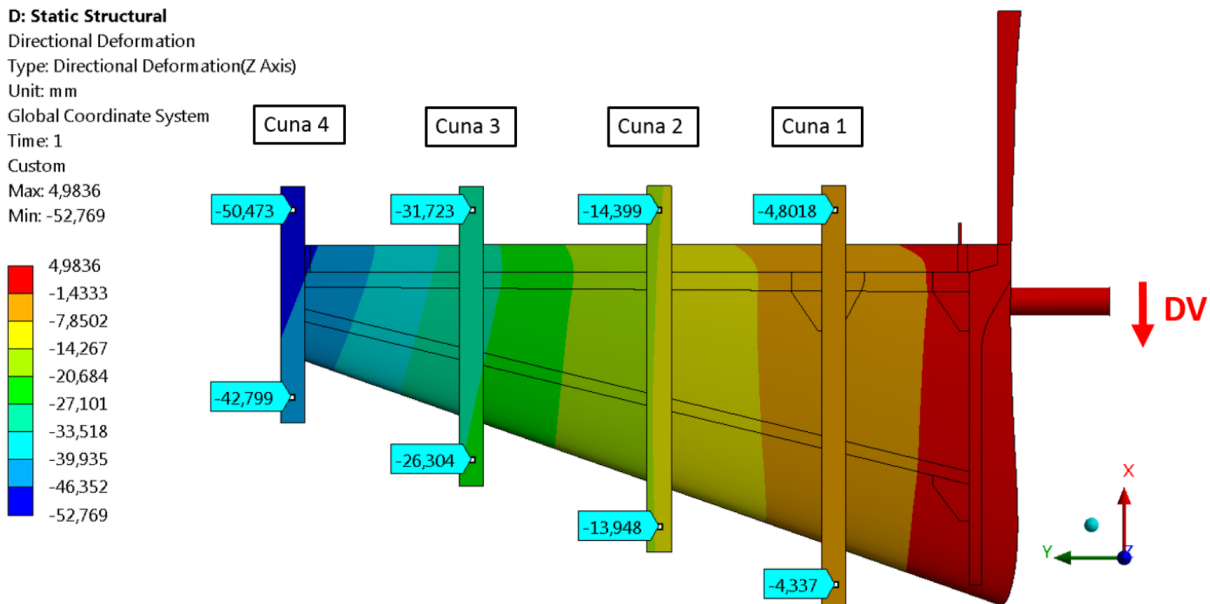


FIGURA 14 - DESPLAZAMIENTOS EN DIRECCIÓN Z EN CASO DE CARGA H07 A CARGA LÍMITE – SENSORES EN ELEMENTOS DE UNIÓN.

Otra vez, en la FIGURA 15 se puede observar en un gráfico la correspondencia entre los valores obtenidos durante el ensayo y los obtenidos mediante la utilización del modelo de elementos finitos. Los puntos representados en el gráfico son los desplazamientos obtenidos en la zona del larguero posterior.

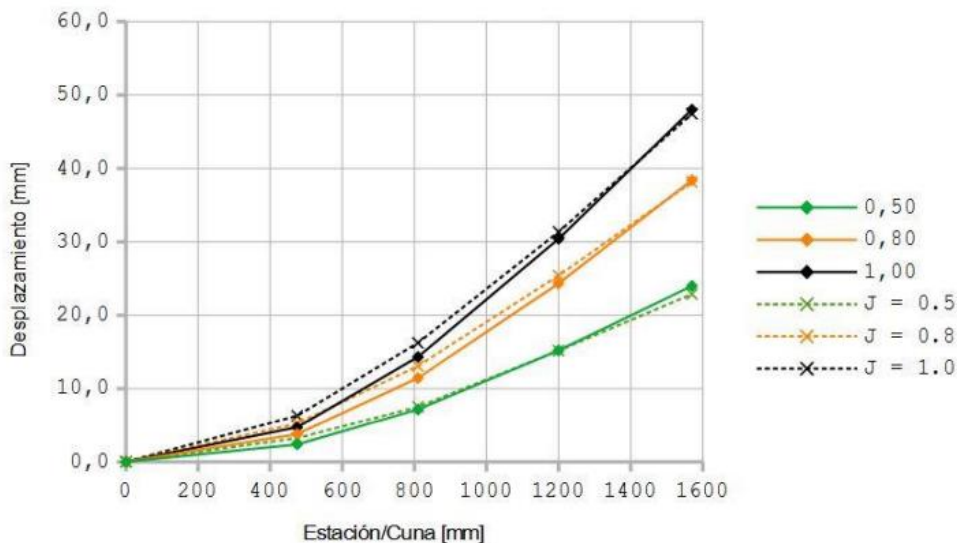


FIGURA 15 - CASO H07: DESPLAZAMIENTOS A LO LARGO DE LA SEMI-ENVERGADURA DEL ESTABILIZADOR HORIZONTAL.

## CONCLUSIONES

Para ambas condiciones de carga, los resultados del ensayo muestran repetitividad en las curvas carga-desplazamiento, linealidad en la respuesta y ajuste con las estimaciones realizadas mediante cálculo estructural.

En ambos casos se alcanzan los niveles de Carga Límite ( $j = 1.0$ ) sin desplazamientos excesivos, comportamientos indeseados ni fallas o defectos, atendiendo a los requerimientos a Carga Límite de ASTM F3114.

Para el caso de carga H07, la estructura resistió y mantuvo la condición de carga, a nivel de Carga Última ( $j = 1.5$ ), durante más de 3 segundos, atendiendo a los requerimientos a Carga Última de ASTM F3114. La falla se inició a un nivel de carga  $j=1,8$  con el despegue de uno de los recubrimientos y culminó con el colapso de la estructura a un valor de  $j=2,3$ .

## REFERENCIAS

1. IT DMA-004-21 Rev. K Criterios de Cálculo - Etapa Preliminar - IA-100B-C.
2. IT DMA-011-20 Rev. 00 Soluciones Estructurales - Etapa Conceptual - IA-100B-C.
3. IT DMA-002-21 Rev. 00 Cargas en las Superficies de Control - IA-100 B/C.
4. IT DMA-005-22 Rev. A Dispositivos Distribuidores de Cargas - Ensayo Estructural de Ala y Empenaje Horizontal - IA-100B-C.
5. IT-GING-119-22 - Informe de Resultados de Ensayo Estructural Estático del Estabilizador Horizontal.