

CAPÍTULO 5: ENSAYOS EXPERIMENTALES: CARACTERÍSTICAS, DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS.

5.1.- INTRODUCCIÓN.

El ensayo de vibración que se describirá en este capítulo está enmarcado dentro de un conjunto de pruebas exigidas por la empresa fabricante de la toma AGU – NACA con objeto de comprobar que dicho componente posee realmente las propiedades y características exigidas y, por tanto, es apto para ser utilizado en el ensamblaje de la aeronave.

El principal problema existente con los materiales compuestos es que el desconocimiento acerca de su comportamiento cuando están sometidos a estados de carga de una mínima complejidad sigue siendo aún importante. Ello hace que sean necesarios gran cantidad de ensayos para verificar el diseño realizado (no olvidemos que la estructura interna de las piezas fabricadas en material compuesto se diseña en función de las sollicitaciones a las que van a ser sometidos) y, a partir de ellos, es posible encontrar fallos que no habían sido tenidos en cuenta, comportamientos anómalos e imprevistos y una serie de particularidades que pueden ayudar al ingeniero a conocer un poco mejor este tipo de materiales y realizar investigaciones acerca de las causas de comportamientos hasta entonces desconocidos.

La experimentación, dentro del campo de la ingeniería, tiene una gran importancia. Sobre todo como comprobación de que el diseño realizado responde a las características inicialmente exigidas, aunque también se muestra como un complemento importante en situaciones en las que el comportamiento real del elemento es difícil de conocer debido a la complejidad constructiva del mismo.

En el caso de la toma AGU – NACA que se constituye en el elemento respecto del cual gira este proyecto, la empresa fabricante del producto (SACESA) encargó al laboratorio del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM) la realización de la siguiente relación de ensayos de

certificación, si bien únicamente el ensayo de vibración será objeto de un análisis más profundo a lo largo del presente capítulo:

- 1) Ensayo de presión. *(Pressure Test)*
- 2) Ensayo de resistencia al envejecimiento. *(Ageing Resistance Test)*
- 3) **Ensayo de vibración estándar.** ***(Standard Vibration Test)***
- 4) Ensayo de variación de temperatura. *(Temperature Variation Test)*
- 5) Ensayo del mecanismo. *(Mechanism Test)*
- 6) Ensayo de fatiga *(Fatigue Test)*

Como ya se comentó anteriormente, todos los ensayos anteriores, a excepción del ensayo de vibración que tuvo que ser realizado en el INTA, se realizaron en dicho laboratorio, existiendo informes sobre la totalidad de los mismos. En los epígrafes siguientes del capítulo se tratará de poner de manifiesto todas las particularidades y características del ensayo de vibración, con objeto de poder advertir de forma más palpable la idoneidad del modelo realizado así como permitir una mejor interpretación de los resultados de cara a la posterior comparación entre los obtenidos de forma experimental y numérica.

5.2.- EQUIPAMIENTO NECESARIO PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.

Todos los ensayos aquí recogidos fueron realizados con equipamiento de vibración electrodinámica controlado por una consola y un ordenador personal.

*5.2.1.- Excitador y mesa de vibración.**

*5.2.2.- Dispositivos de Control y Adquisición de datos.**

*5.2.3.- Medidas de vibración: acelerómetros.**

** Para mayor información acerca de las características del equipamiento utilizado (modelo específico de vibrador, tipo de acelerómetros y características de los mismos) se recomienda consultar las páginas 5 y 6 (apartado. 4 titulado "ENSAYOS"), así como las páginas desde A1 hasta A47 (que contienen la hoja de cableado y las cartas de calibración de acelerómetros) pertenecientes al documento MS/TRE/7220/077/INTA/04. Éste corresponde al informe de resultados presentado por el INTA acerca de los ensayos de vibración.*

5.3.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.

5.3.1.- Objeto del ensayo.

Como ya ha sido comentado con anterioridad, la pieza objeto del ensayo se trata de la toma de aire AGU – NACA componente perteneciente al A – 380 desarrollado por AIRBUS. En la **Fig.5.3.1.1** se muestra la toma de aire AGU – NACA, objeto de los ensayos:

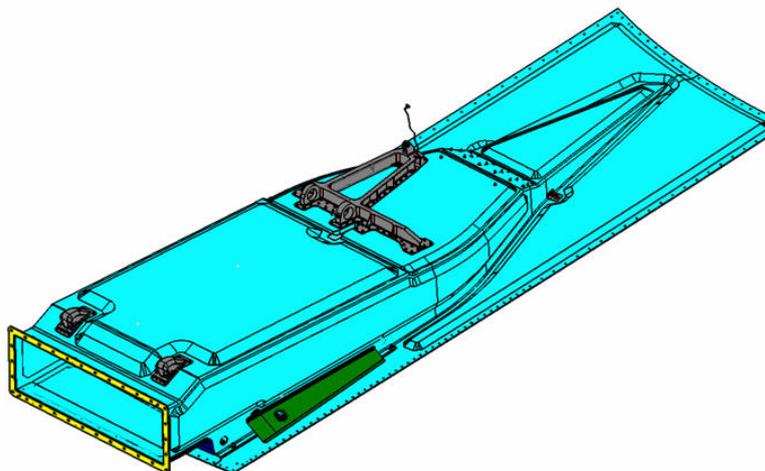


Fig. 5.3.1.1.- Pieza a ensayar.

5.3.2.- Ejes de referencia utilizados en los ensayos.

Los ejes que se toman como referencia para cada uno de los ensayos se muestran en las 3 figuras siguientes:

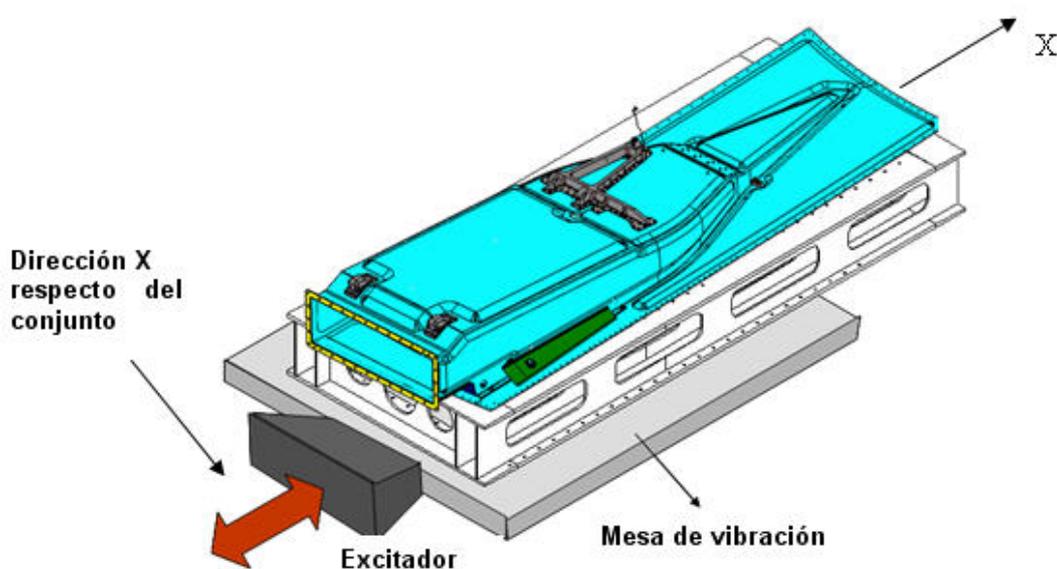


Fig. 5.3.2.1.- Disposición para el ensayo de vibración en el eje X.

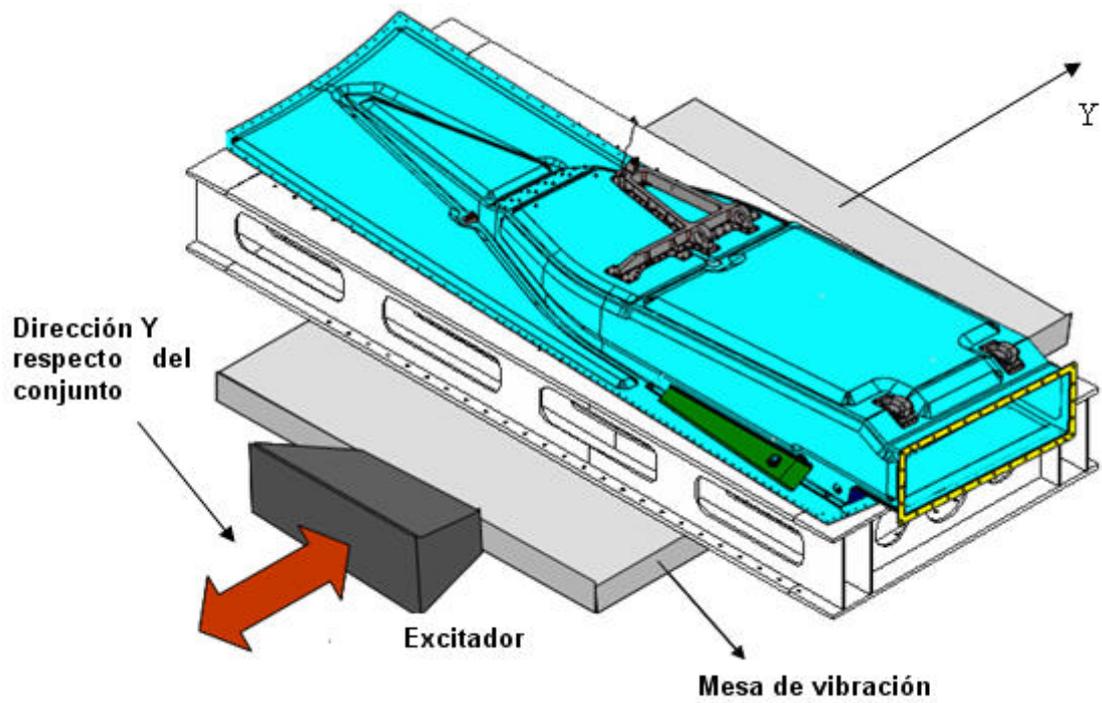


Fig. 5.3.2.2.- Disposición para el ensayo de vibración en el eje Y.

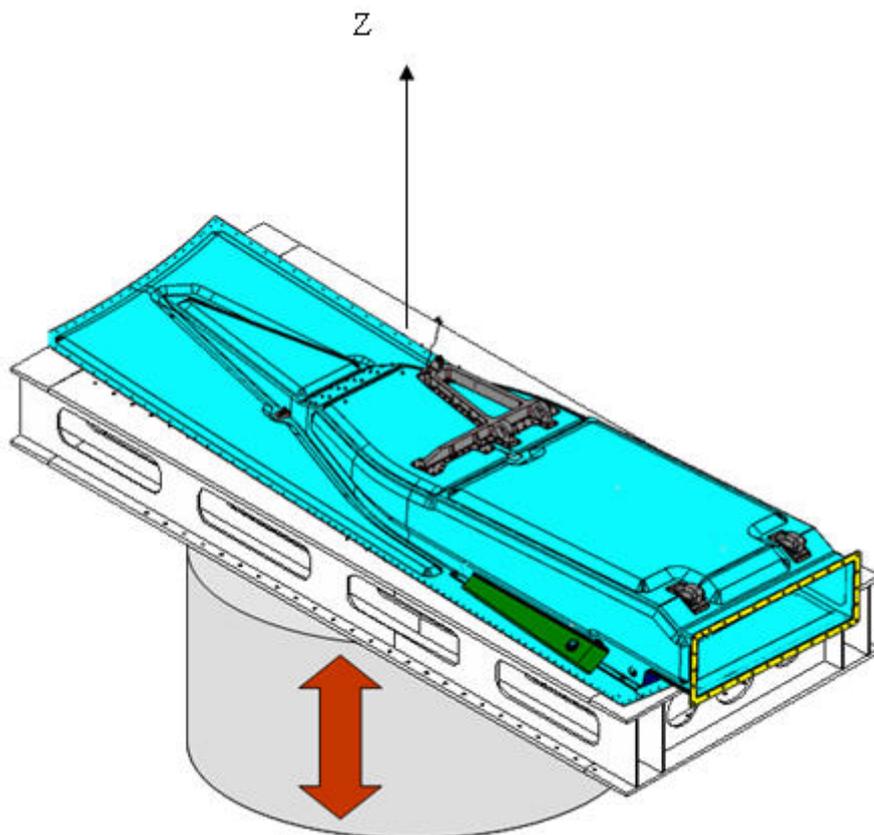


Fig. 5.3.2.3.- Disposición para el ensayo de vibración en el eje Z.

5.3.3.- Procedimiento desarrollado para cada eje de vibración.

Para cada eje de vibración se ha seguido un proceso análogo al que se describe a continuación:

- 1) **Ensayo de vibración con excitación sinusoidal de bajo nivel (Programa A).** Durante el mismo se han recogido datos procedentes de las medidas de los acelerómetros y de la transmisibilidad (transmissibilities) entre los acelerómetros de medida y control.

- 2) Búsqueda de las frecuencias de resonancia y registro de los picos superiores a $2g$ (donde "g" es la aceleración de la gravedad terrestre - $1g = 9.81 \text{ m/s}^2$ -).

- 3) **Ensayo de vibración aleatorio – Random – (Programa B).** En él se recogen los mismos datos que en sinusoidal, además de registrarse la gráfica asociada a *Curva de Densidad Espectral PSD (Power Spectral Density) vs. Frecuencia*.

- 4) **Ensayo de vibración con excitación sinusoidal de bajo nivel (Programa A).** Se vuelve a repetir el ensayo anterior registrándose las mismas medidas y datos que anteriormente.

- 5) Búsqueda de frecuencias de vibración y picos de resonancia mayores que $2g$ para este nuevo caso.

- 6) Comparación entre las frecuencias de resonancia obtenidas antes y después del ensayo de vibración aleatorio con objeto de detectar cambios significativos.

- 7) Comprobación de que tras el proceso anteriormente descrito la pieza mantiene completamente su funcionalidad.

A continuación se muestran tabulados los datos técnicos, así como las gráficas de perfiles asociados a cada uno de los 2 ensayos (Programas A y B) que se mencionan en la descripción procedimental anterior.

Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel (Programa A)	
Frecuencia mínima (Hz):	5
Frecuencia máxima (Hz):	2000
Nivel de aceleración (g):	0.5
Velocidad de barrido(oct/min) (log.):	1
Número de barridos:	1 por eje
Número de ejes:	3 (OX,OY,OZ)
Límite superior Alarma (dB):	2
Límite inferior Alarma (dB) :	-2
Límite superior Aborto del ensayo (dB):	3
Límite inferior Aborto del ensayo (dB):	-3

Tabla 5.3.3.1.-Características técnicas del Ensayo de vibración sinusoidal.

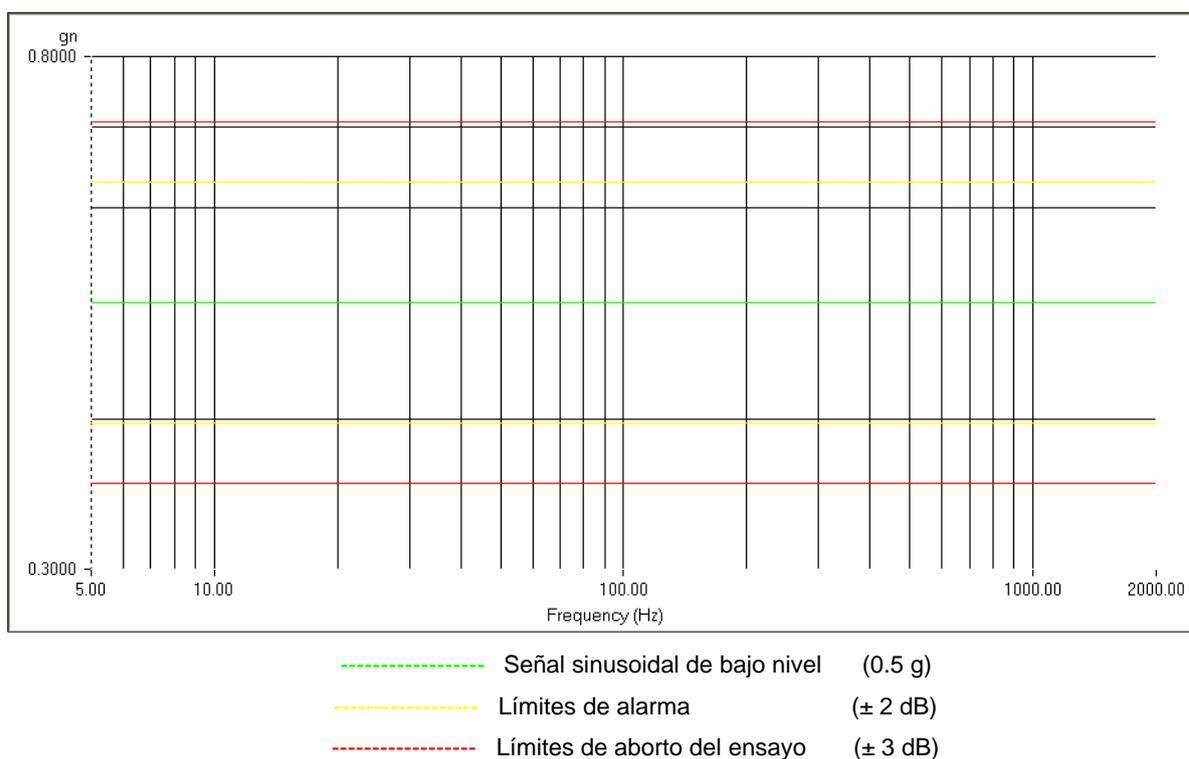


Fig. 5.3.3.1.- Perfil de Excitación y límites (alarma y aborto) para el ensayo de vibración sinusoidal.

El ensayo de vibración aleatorio fue desarrollado siguiendo el *RDCA/DO 160D Sección 8, categoría S, curva C.*⁽¹⁾ (ver nota aclaratoria al final del apdo. 5.3.3).

Como consecuencia del peso de la pieza (70 kg. aproximadamente) es posible realizar una reducción en el nivel, de forma que la curva aplicada corresponde a la C2 (ver **Fig. 5.3.6**).

Ensayo de vibración aleatorio (Programa B)	
Sección Horizontal	
Frecuencia (Hz):	oct-40
PSD (g ² /Hz):	0.012
Sección de pdte. creciente	
Frecuencia mínima (Hz):	40
Frecuencia máxima (Hz):	51.6
Pendiente (dB/oct):	6
Sección Horizontal	
Frecuencia (Hz):	51.6-60
PSD (g ² /Hz):	0.02
Sección Horizontal	
Frecuencia (Hz):	60-500
PSD (g ² /Hz):	0.005
Sección de pdte. Decreciente	
Frecuencia mínima (Hz):	500
Frecuencia máxima (Hz):	2000
Pendiente (dB/oct):	-6
Duración del ensayo por eje:	1 hora
Número de ejes:	3 (OX,OY,OZ)
Límite Superior Alarma (dB):	2
Límite Inferior Alarma (dB) :	-1 (<500 Hz), -2 (>500Hz)
Límite Superior Aborto (dB) :	3
Límite inferior Aborto (dB) :	-1.5 (<500 Hz), -3 (>500 Hz)

Tabla 5.3.3.2.- Características técnicas del Ensayo de vibración aleatorio.

⁽¹⁾ La referencia primera (*RDCA/DO 160D*) corresponde a una norma muy utilizada para la realización de ensayos de componentes aeronáuticos, mientras que las referencias siguientes se encargan de situar el apartado concreto en el que se menciona la información reproducida en ese párrafo.

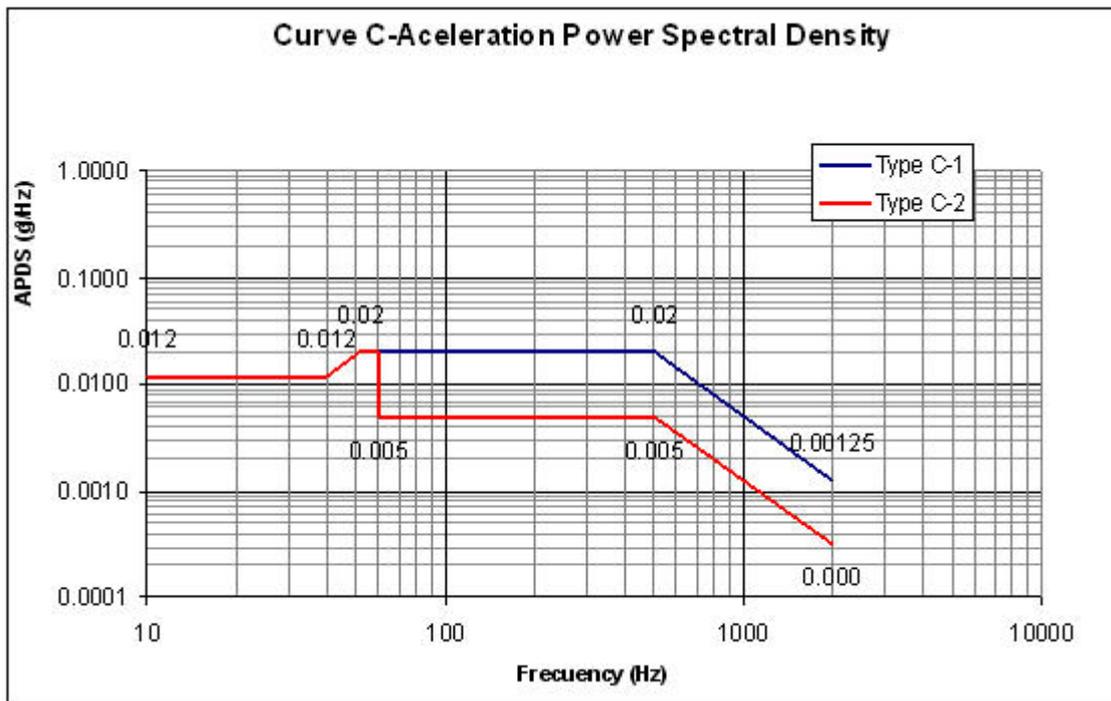


Fig. 5.3.3.2.- Perfil de Excitación y límites para el Ensayo RANDOM.

5.3.4.- Uniones del conjunto entre sí y con la mesa de vibración.

Las uniones necesarias para la fijación de los distintos elementos entre sí así como la relativa al conjunto respecto de la mesa de vibración se realizarán mediante tornillos.

Las fotografías que se disponen a continuación muestran las disposiciones del conjunto para los ensayos en los distintos ejes de vibración, así como la fijación del mismo a la mesa de vibración en cada caso:

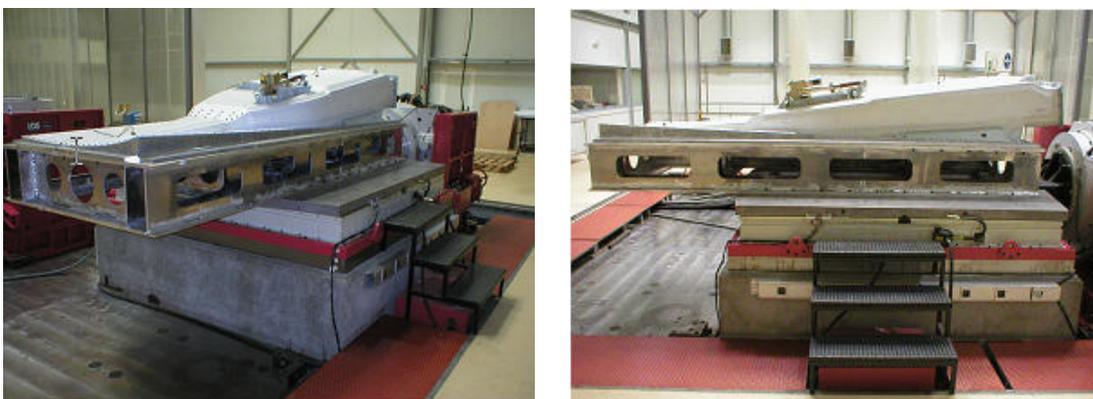


Fig. 5.3.4.1.- Conjunto fijado para el ensayo de vibración en el eje X.



Fig. 5.3.4.2.- Conjunto fijado para el ensayo de vibración en el eje Y.



Fig.5.3.4.3.- Conjunto fijado para el ensayo de vibración en el eje Z.

5.3.5.- Localización de los acelerómetros de medida.

A continuación se anexan figuras en las que se indican la localización de los acelerómetros, tanto de **Control** (cuya denominación está constituida por CX – donde X indica el número correspondiente al acelerómetro y C indica que se trata de un acelerómetro de control –) como de **Respuesta** (cuya denominación, RX, indica que se trata de un acelerómetro de respuesta – R – y el número que corresponda – X –). La diferencia básica entre un **acelerómetro de Control** y un **acelerómetro de Respuesta** es, básicamente, la posición en la que se encuentra cada uno.

El primero se coloca **para controlar la señal de entrada** y, por tanto ha de estar ubicado en lugares que, dentro de lo posible, no se vean demasiado afectados por el efecto de la excitación vibratoria sobre el conjunto (por ejemplo la mesa de vibración – transmisora de la excitación – o zonas del útil atornilladas a la mesa – cuyos desplazamientos están restringidos a los de la mesa –).

Mientras, el segundo se coloca para obtener una medida de la salida de la señal, esto es, cuantifica el efecto que produce la señal de entrada sobre el elemento a ensayar. Por ello debe abarcar todas las zonas de dicho elemento con objeto de que la medida obtenida sea lo suficientemente representativa de las distintas amplificaciones de la señal que se producen en las diferentes zonas del elemento.

Si se logra obtener una buena medida tanto de la entrada como de la salida, es posible construir la **función de transferencia del sistema**, a partir de la cual, pueden obtenerse parámetros importantes del sistema tales como los picos de vibración y las frecuencias a las que éstos se producen.

$$Y(f) = H(f) \cdot X(f) \quad [5.3.5.1]$$

, donde: $Y(f) \equiv$ Señal de salida en frecuencia.

$H(f) \equiv$ Función de transferencia del sistema.

$X(f) \equiv$ Señal de entrada en frecuencia.

De esta forma, disponiendo de parejas de datos $(f, X(f))$ y $(f, Y(f))$, podría obtenerse $(f, H(f))$, como:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad [5.3.5.2]$$

para cada frecuencia f .

En el caso que nos ocupa no disponemos de dichos datos, sólo de la representación gráfica de las señales de control y respuesta (entrada y salida),

por lo cual no ha sido posible obtener las frecuencias de resonancia a través de este procedimiento. El informe entregado por el INTA al laboratorio de GERM

incluye las frecuencias naturales más importantes (por encima de 2g) del conjunto para los ensayos sinusoidales.

Después de cada una de las figuras a las que anteriormente se ha hecho referencia aparecen varias fotografías tomadas en el lugar de realización del ensayo, con objeto de mostrar la fijación de los acelerómetros al útil así como la apariencia real de los mismos.

NOTA: Cuando en las figuras asociadas a la ubicación de los distintos acelerómetros aparece solamente una dirección (ya sea X, Y, Z) esto indica que el acelerómetro es uniaxial (sólo recoge medidas de aceleraciones en la dirección indicada). Cuando sobre el acelerómetro aparecen 3 ejes esto es indicativo de la naturaleza triaxial del mismo, de forma que es capaz de registrar de forma separada las aceleraciones en las 3 direcciones.

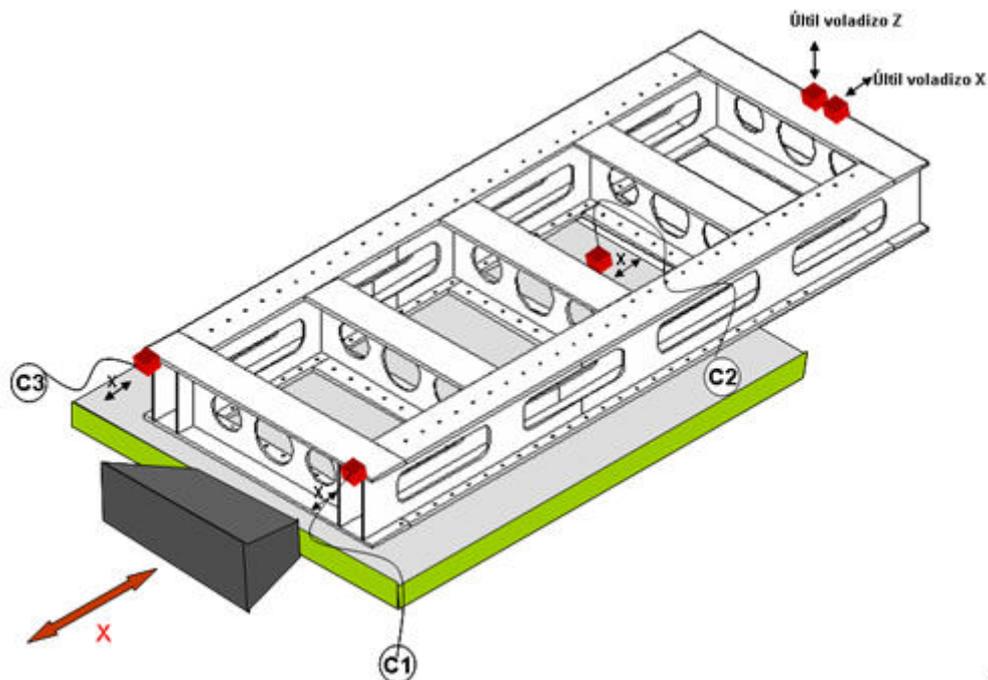


Fig.5.3.5.1.- Disposición de acelerómetros para los ensayos de vibración del útil (sólo realizados en eje X).

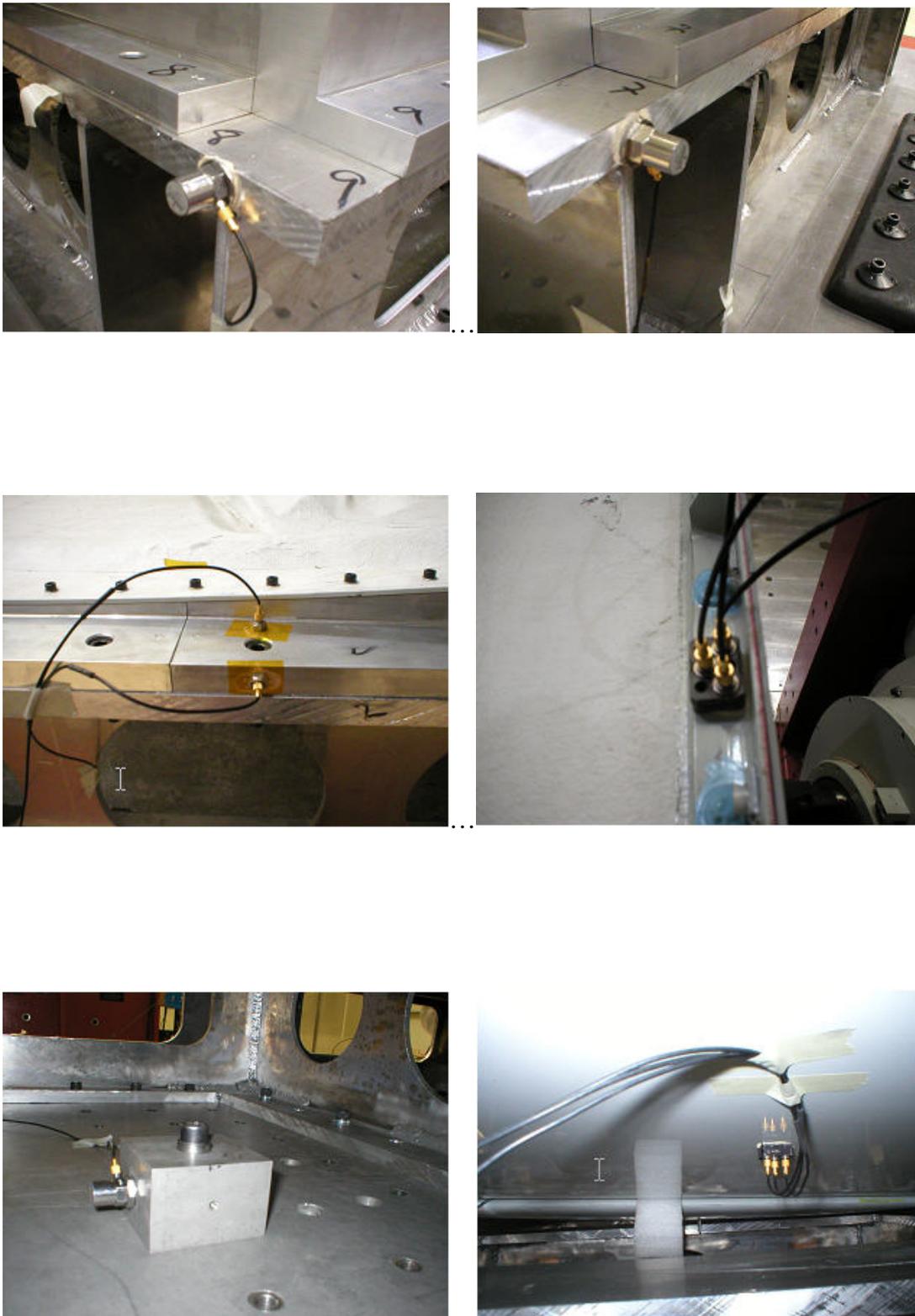


Fig. 5.3.5.2.- Disposición de acelerómetros para los ensayos de vibración del útil en el eje X.

Se cree conveniente reseñar que los acelerómetros piezoeléctricos han sido fijados sobre el conjunto a ensayar con ayuda de cera y adhesivo de contacto (Loctite).

5.3.6.- Desarrollo de los ensayos.

El desarrollo de los ensayos se muestra en la siguiente tabla, en la que se recoge la **fecha de realización**, el **programa** al que pertenece (la primera letra hace referencia a los programas A ó B mientras que la segunda corresponde al eje de vibración), la **duración** del mismo, una breve **descripción** y, por último, las **observaciones** realizadas tras los ensayos.

Los resultados obtenidos de estos ensayos, en lo que a gráficas de control y de respuesta se refiere pueden consultarse en los anexos al informe facilitados por el INTA al laboratorio del GERM. Estas gráficas servirán de base para la comprobación numérica – experimental que se desarrollará en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 5: ENSAYOS EXPERIMENTALES: CARACTERÍSTICAS, DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS.

Fecha	Programa	Duración	Descripción	Observaciones
24/11/2004	A-X1	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OX. Flaps cerrados.	-
24/11/2004	B-X2	1 hora	Ensayo de vibración aleatorio a temperatura ambiente en dirección OX. Flaps cerrados.	-
24/11/2004	A-X3	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OX. Flaps cerrados. , comparando con el Programa A anterior.	No se aprecian cambios significativos ni en el desarrollo del ensayo ni en las frecuencias de resonancia
			Paso de Flaps cerrados a Flaps abiertos	
24/11/2004	A-X4	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OX. Flaps abiertos.	-
24/11/2004	B-X5	1 hora	Ensayo de vibración aleatorio a temperatura ambiente en dirección OX. Flaps abiertos.	-
24/11/2004	A-X6	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OX. Flaps abiertos. , comparando con el Programa A anterior.	No se aprecian cambios significativos ni en el desarrollo del ensayo ni en las frecuencias de resonancia
24/11/2004	A-Y1	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OY. Flaps abiertos.	-
24/11/2004	B-Y2	1 hora	Ensayo de vibración aleatorio a temperatura ambiente en dirección OY. Flaps abiertos.	-
24/11/2004	A-Y3	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OY. Flaps abiertos. , comparando con el Programa A anterior.	No se aprecian cambios significativos ni en el desarrollo del ensayo ni en las frecuencias de resonancia
			Paso de Flaps abiertos a Flaps cerrados	
	A-Y4	10	Ensayo de vibración sinusoidal de	Desde este momento y hasta el

CAPÍTULO 5: ENSAYOS EXPERIMENTALES: CARACTERÍSTICAS, DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS.

25/11/2004		minutos	bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OY. Flaps cerrados.	final de los ensayos los canales R5z y R6x presentaban lecturas erróneas debido a que sus cables se rompieron al cambiar de posición los Flaps.
25/11/2004	B-Y5	1 hora	Ensayo de vibración aleatorio a temperatura ambiente en dirección OY. Flaps cerrados.	-
25/11/2004	A-Y6	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OY. Flaps cerrados. , comparando con el Programa A anterior.	No se aprecian cambios significativos ni en el desarrollo del ensayo ni en las frecuencias de resonancia.
			Paso de Flaps cerrados a Flaps abiertos	
25/11/2004	A-Z1	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OZ. Flaps abiertos.	-
25/11/2004	B-Z2	1 hora	Ensayo de vibración aleatorio a temperatura ambiente en dirección OZ. Flaps abiertos.	-
25/11/2004	A-Z3	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OY. Flaps abiertos. , comparando con el Programa A anterior.	No se aprecian cambios significativos ni en el desarrollo del ensayo ni en las frecuencias de resonancia.
			Paso de Flaps abiertos a Flaps cerrados	
29/11/2004	A-Z4	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OZ. Flaps cerrados.	-
29/11/2004	B-Z5	1 hora	Ensayo de vibración aleatorio a temperatura ambiente en dirección OZ. Flaps cerrados.	-
29/11/2004	A-Z6	10 minutos	Ensayo de vibración sinusoidal de bajo nivel a temperatura ambiente en dirección OZ. Flaps cerrados. , comparando con el Programa A anterior.	No se aprecian cambios significativos ni en el desarrollo del ensayo ni en las frecuencias de resonancia

5.4.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES REALIZADOS SOBRE EL ÚTIL.

En este apartado se reproducen las gráficas obtenidas a partir de la medida del acelerómetro uniaxial colocado en el voladizo del útil rigidizador (ver **Fig. 5.4.1**). A partir de ella se analizarán las frecuencias de vibración obtenidas y la mayor o menor importancia de los distintos modos de vibración derivados.

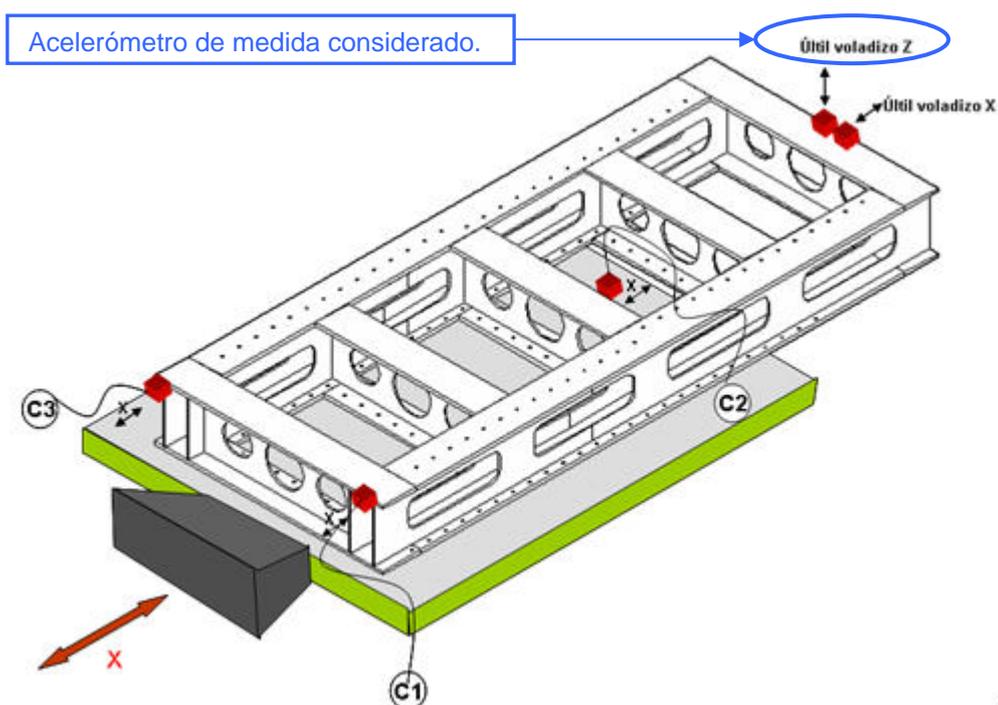


Fig.5.4.1- Identificación del acelerómetro que proporciona los datos para las representaciones gráficas.

5.4.1.- Ensayo sinusoidal.

En la gráfica mostrada en la **Fig. 5.4.1.1**, se representan en el eje de ordenadas la magnificación de aceleración respecto de la señal de entrada que experimenta el útil rigidizador medidos en “g” ($g=9.81 \text{ m/s}^2$) y en el de abscisas el rango de frecuencias del ensayo (5 – 2000 Hz.).

La gráfica muestra una primera zona en la que el útil experimenta una aceleración de valor constante (del orden de 0.4g) como respuesta a la excitación de entrada introducida, que, recuérdese, se trataba de 0.5g en dirección X. Ese comportamiento se mantiene hasta frecuencias del orden de

70 Hz, a la que se produce una pequeña perturbación, aunque no de la importancia suficiente como para hablar de frecuencia de resonancia. A partir de ahí, la magnificación de aceleración continúa incrementándose suavemente hasta alcanzarse, en el entorno de los 263.23Hz, un primer cambio brusco lo suficientemente importante como para hablar de una primera frecuencia de resonancia.

Una vez cuantificada esta primera frecuencia natural, las 4 restantes que se obtienen se encuentran en un rango comprendido entre 262 y 610 (Hz), siendo los valores exactos que recoge el acelerómetro de 300.19, 345.39, 434.15 y 609.12 Hz para las restantes, respectivamente. A partir de ahí la señal del acelerómetro comienza a disminuir embebida en un comportamiento oscilatorio que ya no arroja más variaciones significativas.

Si se comparan estos valores con los derivados del análisis numérico se observan discrepancias. En un principio se consideró no incluir la mesa de vibración en el modelo de EF, imponiendo las condiciones de contorno adecuadas en los nodos de la superficie inferior del útil (de hecho así fue como se calcularon las frecuencias de resonancia durante el proceso de diseño del útil para comprobar que los valores obtenidos estaban lo suficientemente alejados de los asociados a la toma NACA como para no influir en las frecuencias naturales de la pieza), sin embargo, la introducción de la misma se demostró que acercaba más los resultados numéricos a los experimentales, pues provocaba el aumento de los valores de frecuencias de resonancia obtenidos en las primeras pruebas.

Quizás haya otras consideraciones no tenidas en cuenta en el presente proyecto que permitirían la obtención de resultados algo más cercanos a los experimentales, aunque la consecución de valores de frecuencia de vibración muy cercanos en análisis numéricos y ensayos experimentales es complicado y no siempre alcanzable debido a la gran cantidad de factores que influyen en el proceso.



ENSAYO SINUSOIDAL

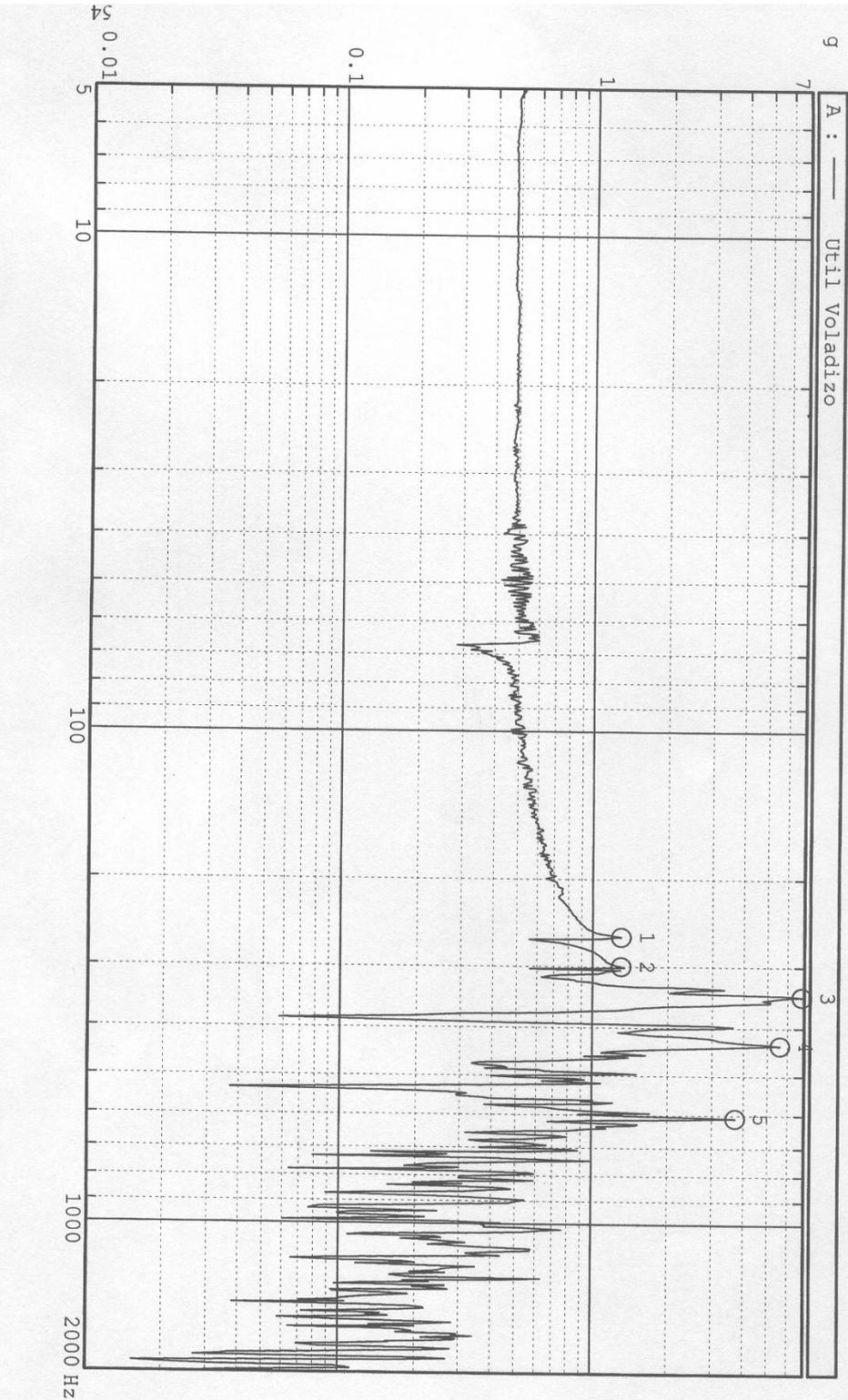
Customer : AICIA

Project : A_380

Structure : AGU - NACA

Codigo Test : Util X

Control Type : MAX



Util Voladizo

X(Hz)	Y(g)
# 1	262.23 1.3
# 2	300.19 1.3
# 3	345.39 6.83
# 4	434.15 5.6
# 5	609.12 3.71
# 6	undef undef
# 7	undef undef
# 8	undef undef



Fig. 5.4.1.1.- Gráfica resultante del ensayo sinusoidal sobre el útil obtenida a partir de las medidas del acelerómetro ubicado en el voladizo.

5.4.2.- Ensayo de vibración aleatorio (RANDOM).

Si se representan gráficamente los valores de aceleración (salida) obtenidos a partir de las medidas del mismo acelerómetro que en el apartado anterior, pero esta vez asociados a una excitación de entrada aleatoria cuyo comportamiento ha de ajustarse al perfil proporcionado en la **Fig. 5.3.3.2** (estando sus valores comprendidos entre los límites inferior y superior) pueden obtenerse evoluciones como la mostrada en la **Fig. 5.4.2.1**.

En este ensayo trata de recrearse la excitación vibratoria provocada por las corrientes de aire sobre un elemento aeronáutico que pertenece a un avión que se encuentra en pleno vuelo. Para ello se introducen excitaciones cuyo valor de aceleración, para cada frecuencia, representa un porcentaje del valor especificado en el perfil contenido en la norma que controla el ensayo (ver **Fig. 5.3.3.2**). Se realizan tantos barridos en el rango de frecuencias de trabajo como sean necesarios de forma que al sumar las excitaciones introducidas para cada barrido para todos los barridos considerados, se obtenga el perfil especificado en la norma para este tipo de ensayos.

Si una pieza que ha sido sometida a este tipo de ensayo no ve afectadas sus propiedades de forma importante en relación a las que poseía con anterioridad a la realización del mismo se entiende que la pieza es apta para ser utilizada en la construcción aeronáutica.

El útil rigidizador también fue sometido a este ensayo, puesto que después formaría parte de la aparatamenta necesaria para poder ensayar la toma AGU – NACA y había que comprobar que era capaz de soportar el ensayo sin sufrir daños.

