

# PUESTA EN MARCHA DE UN BANCO DE ENSAYOS DE FATIGA COMBINADA.

B. Zamorano. J. Merino. A.M. Irisarri.

Departamento de Caracterización, fundación INASMET.

**Resumen.** La reducción de pesos en los componentes es una meta a lograr en un amplio sector técnico. Esta reducción de pesos presenta las ventajas de un ahorro en material coste y supone una mejora significativa en el componente, especialmente en los sectores aeronáutico y espacial. Este ahorro no debe suponer una disminución en las propiedades del componente en cuanto a fiabilidad y seguridad. Como es sabido uno de los mecanismos de fallo imperantes es el fallo por fatiga. Aparece por lo tanto el problema de la necesidad de un mayor conocimiento del comportamiento a fatiga en unas condiciones lo más reales posibles a las del funcionamiento del componente. Este trabajo describe la puesta en marcha de un banco de ensayos para fatiga combinada en componentes.

**Abstract.** Weight saving is one of the more interesting goal to be achieved. The research industries interested in this saving involve sectors like the aeronautic and space as well. The weight saving suppose in some cases a cost saving. It is clear that this weight saving cannot be in decrement of the safety and performance of the component. The fatigue is well known to be one of the most common failure mechanisms. The arising problem is to have a better knowledge about the fatigue behaviour of the materials in the real loading conditions. This paper describes the set-up of a combined cycle fatigue-testing rig.

## 1. INTRODUCCIÓN

El ahorro en los pesos en los componentes viene impuesto desde varios sectores industriales de gran relevancia, como son el aeronáutico, espacial y los relacionados con el transporte en general. Este ahorro de peso entraña el reto de un mayor conocimiento de las sollicitaciones a las que se ve sometido un componente así como su comportamiento bajo éstas. Dentro de los diferentes mecanismos de fallo se sitúa entre otros la fatiga, siendo este uno de los más importantes, llegando a representar más del 50% de las roturas, cifra que se eleva aún más si se tiene en cuenta que en algunos fallos atribuidos a otras causas la fatiga ha jugado un papel importante.

El ajuste de la vida de los componentes a fatiga entraña diferentes aproximaciones. La primera es un avanzado conocimiento de las cargas en servicio del componente. Éstas rara vez son conocidas con exactitud a pesar disponerse de una amplia biblioteca de diferentes sollicitaciones genéricas. Una vez calculadas las cargas a las que el material va a encontrarse sometido, el modelizado por elementos finitos del componente proporciona la distribución de tensiones, permitiendo el cálculo de la vida a fatiga del mismo. A este respecto conviene señalar que estas aproximaciones acarrear unos errores que vienen dados por el método usado. Además de los errores implícitos en el cálculo por elementos finitos, la incógnita en el espectro de carga, como un factor no despreciable está el error relacionado con el conocimiento de la interacción entre los diferentes comportamientos propios de la fatiga. Es decir, interacción entre fatiga de bajo y alto número de

ciclos así como la interacción entre las diferentes direcciones de aplicación de tensiones que dan lugar a fatiga multiaxial.

Una de las posibles soluciones que vienen imponiéndose debido los controles de calidad, cada día más exigentes, a los que se someten los componentes, es el ensayo sobre componente. Este tipo de ensayo elimina en parte los errores relacionados con el método de los elementos finitos y la interacción entre los diferentes modos de fatiga, quedando sin solución el problema asociado con el conocimiento de las cargas reales.

El objetivo en el trabajo realizado fue profundizar en el conocimiento del comportamiento de los componentes en fatiga combinada de bajo y alto número de ciclos. Para un mayor acercamiento a las cargas reales que soporta el componente se decidió que el estudio necesitaba de la puesta en marcha de un banco específico para los ensayos.

El componente a analizar es en el caso del presente estudio un álabe de compresor de alta, y su material se trata de una aleación de titanio Ti-6Al-4 V. Las sollicitaciones que actúan sobre este componente comprenden una tracción debida a la fuerza centrífuga así como una carga asociada a la vibración y a la torsión de la misma.

El estudio se ha realizado en el marco de un proyecto europeo llamado RAMGT [1] y la tecnología empleada pertenece en su origen a la empresa Rolls Royce. Ésta fue transferida y adaptada para el distinto

comportamiento del material presente y de los medios disponibles en INASMET. En el presente trabajo se describen aquellos aspectos que no afectan a la confidencialidad de la información recibida y, especialmente, el trabajo realizado en INASMET para su implantación.

INASMET partía para la puesta en marcha de esta complicada aplicación con una amplia experiencia previa para la realización de ensayos sobre componentes. Esta incluye ensayos a fatiga tanto de hélices propulsoras de barcos pequeños como de cajas de cambio de coches, cuadros de bicicletas y un número elevado de otros componentes.

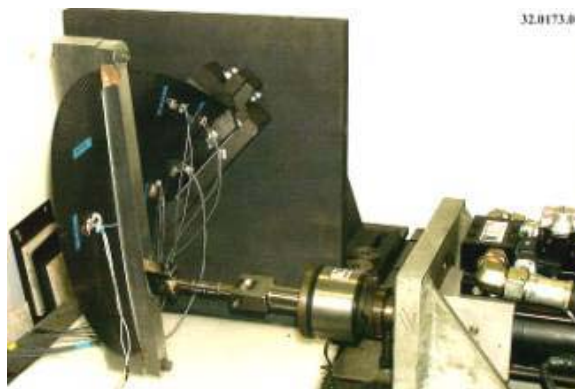
## 2. INSTALACIONES DE PARTIDA.

INASMET dispone de unas instalaciones capaces de permitir la realización de ensayos sobre componentes. Puesto que las mismas tienen mucha importancia en la realización del ensayo y de los cálculos previos se describen aquí brevemente.

Las instalaciones comprenden una bancada de ensayos mecanizada en fundición que permite la unión de los distintos componentes, tanto los de amarre como los activos. Esta bancada permite la colocación de los elementos en casi cualquier posición. La figura 1 muestra un componente preparado para ser ensayado en el banco. Esta bancada presenta una gran rigidez teniendo este factor importancia debido a la introducción de vibraciones en el sistema. Las dimensiones de la bancada son de 4 por 2.5m, un tamaño más que apropiado para la mayoría de las aplicaciones de ensayos sobre componentes.

Se dispone de tres actuadores hidráulicos INSTRON además de 10, 50 y 100KN. Estos actuadores se complementan con un vibrador de 1000N y diversos aparatos de medida NI.

Los medios disponibles permiten una gran cantidad de configuraciones posibles así como de cargas a ser aplicadas. Pueden realizarse ensayos en componentes que comprenden fatiga uniaxial, multiaxial, combinada, vibraciones, torsión, tracción y todas las combinaciones de estos modos. Todo ello proporciona una gran flexibilidad que no llegó a utilizarse en la realización del presente trabajo ya que en este caso solo fueron utilizados el actuador de 100KN y el vibrador.



**Fig1.** Pala de propulsión de barco siendo ensayada en las instalaciones de INASMET.

## 3. DISEÑO PRELIMINAR.

El primer paso en la puesta en marcha del banco de fatiga combinada consiste en el diseño preliminar.

La etapa de diseño es fundamental ya que si se lleva a cabo de la manera correcta evita problemas cuya solución siempre resulta más cara en la etapa de desarrollo. Debe de hacerse un análisis de todos los factores que puedan influir en el ensayo. La norma debe de ser tener en cuenta todos los factores posibles en esta etapa.

El diseño comienza con la definición del ensayo analizando exactamente cuales son las características del ensayo y los resultados que se pretenden obtener.

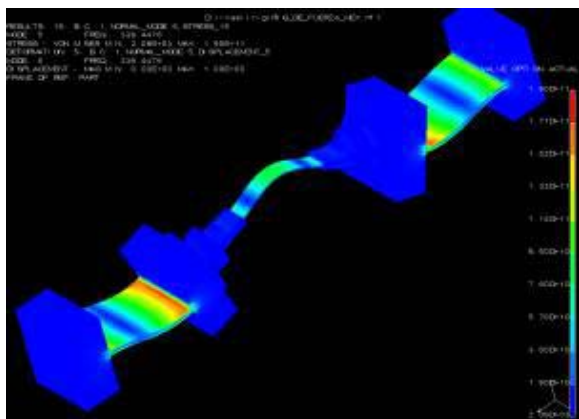
Se trata en el caso del presente estudio de un ensayo de fatiga combinada de alto número de ciclos (HCF) en una dirección unido a una fatiga de bajo número de ciclos (LCF) en la perpendicular. El objetivo es construir un dispositivo que introduzca una cantidad conocida de ciclos de alta frecuencia por cada ciclo de baja. La carga LCF es introducida por medio de un actuador hidráulico de los existentes en INASMET, mientras que la carga HCF es introducida por medio de una vibración por el excitador dinámico. La carga HCF se controla mediante la amplitud de la vibración introducida.

Esta combinación simula de manera plausible el comportamiento de un álabe de turbina en su funcionamiento.

Al introducir la carga de HCF mediante una vibración aparecen varios factores que deben de ser tenidos en cuenta. La vibración debe de excitar principalmente la probeta, es decir, introducir la mayor cantidad de energía posible en la probeta a ensayar. Esto requiere tener en cuenta dos factores, uno la transmisión de la energía y dos que es necesario evitar que la vibración se transmita a la estructura del banco o al actuador (ver figura 2).

Llegados a este punto es necesario tener en cuenta el diseño de la probeta. Este factor es crucial, ya que los modos normales del sistema se van a ver influidos de manera considerable por la geometría de la probeta de ensayo. Además, no se puede olvidar que el movimiento de la misma producirá una distribución de tensiones que es la que debe utilizarse a la hora de calcular la interacción de las dos ondas de fatiga distintas.

Tanto para el amortiguamiento de la vibración como para la transmisión de la energía se realizaron cálculos por elementos finitos para su correcto diseño. Los cálculos referentes al sistema de amortiguamiento fueron desarrollados por Rolls Royce para el caso de un actuador electromecánico. El sistema de transmisión se diseñó basándose en un modelo de Rolls Royce modificándolo para las distintas prestaciones de las instalaciones y material presente en INASMET. La figura 2 muestra uno de los modos de vibración del modelizado del sistema.



**Fig 2.** Uno de los modos normales de vibración del sistema de ensayo. Un modelo más completo que el representado es necesario para un correcto diseño.

En este punto se debe tener muy presente que los comportamientos frente a las vibraciones de un actuador electromecánico y de uno hidráulico son muy diferentes. Debido al aceite, la absorción en el actuador hidráulico es mucho mayor. Este punto hace que deba establecerse una modificación en el sistema. Esta modificación puede acarrear bien la introducción de una mayor potencia o bien la reducción del amortiguamiento en otros componentes del dispositivo. En el caso presente se optó por una mezcla de ambas soluciones, aumentando la potencia del vibrador frente a la prevista inicialmente y la rigidez del sistema.

Otro de los datos a tener en cuenta en el análisis anterior al inicio de la puesta en marcha es el tipo de vibrador a ser utilizado. Deben tenerse en cuenta las distintas opciones posibles, en especial en lo referente a la masa móvil del vibrador. Ésta está íntimamente relacionada con el intervalo de frecuencia en el que se van a realizar los ensayos. La sujeción de esta masa en el vibrador

debe de ser también conocida debido a la rigidez de la misma que puede producir efectos no deseados. Estos problemas pueden ser una mayor absorción de lo deseada en algunos intervalos de frecuencia o una excesiva rigidez que haga difícil el mantenimiento de la frecuencia deseada.

El último punto de diseño que conviene considerar en cuanto al vibrador se refiere a la sujeción del mismo. Ésta debe ser capaz de amortiguar la vibración evitando que se transmita. Para ello las frecuencias propias de sistema deben de ser mucho menores que la frecuencia a emplear en el ensayo. El amarre debe evitar al mismo tiempo tener un elevado coeficiente de amortiguación que produzca un gasto excesivo de energía.

Como resumen de esta etapa está insistir en la verdad por todos conocida de que un buen diseño ahorra mucho dinero y trabajo, por lo que esta es quizás la parte más importante del trabajo. Esto es por supuesto aplicable a prácticamente todos los distintos ensayos sobre componente. Primero hay que determinar el objeto del ensayo, qué información se quiere extraer. Tras este punto crucial se deben responder a diferentes preguntas para alcanzar este conocimiento. ¿Cómo se va a medir?. ¿Qué medios se necesitan?. ¿Cómo se va a introducir la sollicitación?, ¿Cómo va a amarrarse el componente. que efectos va a producir en el sistema la introducción de la sollicitación, y si estos van a acarrear algún tipo de interferencia o problema?.

#### 4. SISTEMA DE CONTROL.

Una vez decidido el diseño del sistema mecánico queda decidir el sistema de control. El sistema incluye los parámetros que deben de ser medidos y los diferentes métodos que van a usarse para llevar a cabo estas mediciones.

Debe tenerse en cuenta en estas medidas la velocidad de adquisición que va a ser necesaria para el sistema. Esta velocidad condiciona en gran medida la elección del sistema de adquisición a ser usado. Los sistemas de adquisición suelen llevar en su electrónica filtros pasa banda que pueden condicionar su uso, estos filtros pueden estar en el propio sistema físico de medida como en su electrónica de acondicionamiento de la señal.

Puesto que el presente trabajo se introduce una de las sollicitaciones en forma de vibraciones, se va a comentar este aspecto. La vibración tiene una frecuencia característica del orden de KHz. Dado que utiliza menos de 20 puntos para caracterizar una onda sinusoidal puede originar problemas de precisión, la velocidad característica de adquisición del sistema no será menor de 20Khz siendo en realidad necesarias velocidades del orden de 40KHz o más.

El actuador hidráulico se controla vía GPIB con su dispositivo asociado de control que se trata de un sistema Instron 8800. La vibración se introdujo

mediante una tarjeta generadora de onda de NI y un circuito con la función de seleccionar la amplitud de la onda sinusoidal.

El sistema se realimenta con la amplitud medida en la probeta. Esta es medida mediante un sensor láser de desplazamiento. La probeta se mantiene en resonancia controlando la frecuencia y la amplitud de la señal introducida al amplificador del vibrador. De este modo se consigue una sollicitación de la carga deseada. La carga se relaciona con el desplazamiento mediante el cálculo de elementos finitos de los modos de vibración. Es en este punto donde vuelve a apreciarse la enorme importancia de un cálculo adecuado para obtener unos modelos representativos de las cargas que realmente van a manifestarse y por lo tanto unos resultados coherentes.

Una vez decididos los controles individuales para cada uno de los dos elementos activos del sistema debe de plantearse el sistema de control de todo el conjunto. Éste generalmente va a ser un programa de control en un ordenador. En el presente estudio se utilizó una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments DAQ NI 6062E. El lenguaje de control utilizado fue Lab-view. Este software de control permite hacer rápidas correcciones al programa adaptándolo a los requerimientos puntuales de una máquina de ensayos. Asimismo, permite introducir fácilmente otros sistemas de medida adicionales para complementar las medidas básicas necesarias para el control. Como contrapartida la velocidad de procesamiento, al tratarse de un lenguaje de alto nivel, es bastante lenta lo que impide llevar a cabo correcciones rápidas en el sistema. La implicación más directa de este problema se halla en que el amortiguamiento del sistema conviene que sea lo suficientemente elevado como para permitir picos anchos que permitan un control lo suficientemente suave. Esto por supuesto se traduce en una pérdida excesiva de energía. Debe buscarse por lo tanto un equilibrio.

Uno de los grandes problemas del sistema de control son las pruebas de funcionamiento. En ellas debe buscarse sobre todas las cosas que no se produzca un fallo catastrófico que acarree la rotura de alguno de los elementos del sistema. Este punto se discutirá con una mayor profundidad en el apartado de las pruebas preliminares.

## 5. MONTAJE Y PRUEBA.

Una vez completado el diseño tanto del control como del sistema en general tan sólo resta el mecanizado de los mismos. Tras éste viene el montaje del sistema. En esta fase debe tenerse muy en cuenta que todos los componentes queden posicionados correctamente. En especial debe prestarse especial cuidado a la posición del vibrador ya que este puede sufrir algún tipo de desperfecto si el desplazamiento no es del todo lineal.

En el presente caso se disponía de un gran número de grados de libertad en el posicionamiento de los elementos en la bancada.

Se pueda apreciar en la figura 3 el montaje completo situado en la bancada.



Figura 3. fotografía del montaje completo.

Tras el montaje comenzaron las diferentes pruebas del funcionamiento del sistema. El montaje comenzó con la prueba del correcto funcionamiento de la electrónica asociada al sistema. Se descubrió que el ruido eléctrico era más elevado de lo recomendable por lo que se pasó a filtrar las señales mediante el uso de filtros asociados a las frecuencias implicadas. La introducción de estos filtros hace necesaria la calibración de los distintos elementos. La atenuación de los filtros se calculó mediante un osciloscopio y un generador de onda. Además del ruido ambiental, se descubrió una componente transmitida por la alimentación, tanto del ordenador como de los distintos elementos. Este ruido se eliminó fácilmente mediante el uso de corriente estabilizada.

Una vez comprobada la electrónica se continuó efectuando pruebas del control. Se realizaron las primeras pruebas con el sistema desacoplado, primero sobre el vibrador y luego sobre el actuador.

Tras esa etapa se pasó a la realización de pruebas del sistema completamente montado y con todos los componentes funcionando al mismo tiempo. Se apreciaron los siguientes puntos de interés. En primer lugar, las vibraciones implicadas en el ensayo interaccionaban con el control PID del actuador hidráulico. Las vibraciones se transmitían por la base del actuador a la bancada.

El problema del PID era que hacía entrar al actuador hidráulico en resonancia. En este caso se introduce una carga desconocida en la probeta. Este problema se solucionó modificando las velocidades de subida y bajada de la rampa y cambiando los valores PID del control.

El otro problema implica que ha de cambiarse el acoplamiento de la bancada al actuador a uno menos rígido. La elección del acoplamiento se realizó teniendo en consideración todos los cálculos del sistema y sobre todo las implicaciones que pudiera tener en referencia a las absorciones del sistema en las frecuencias de interés.

Tras las pruebas preliminares se pasó a comprobar el alineamiento del sistema ya que se trata éste de un factor clave dadas las sollicitaciones que se introducen en el sistema. Esto se debe a que localmente las tensiones que aparecen en la superficie de la probeta de ensayo son del modo 1 siempre que la dirección del componente sea la adecuada. En el momento que el alineamiento del sistema no es completamente lineal aparecen unas componentes de la tensión que no son las deseadas, es decir, el modelo empleado para calcular en las cargas en función del desplazamiento deja de tener validez por lo que las condiciones de ensayo no son las que se buscan. Se comprobó el alineamiento con una probeta con galgas distribuidas por la superficie consiguiendo un alineamiento con desviaciones inferiores a un 5%.

Ya sólo resta el realizar los ensayos de validación del sistema. Para ello se efectuaron tres ensayos de prueba con el fin de comparar los resultados con aquellos obtenidos en otras máquinas similares y para validar los modelos empleados. El primer detalle que se observó fue que la rotura de las probetas no se producía en la zona predicha por el cálculo por elementos finitos lo que obligó a cambiar el modelo y el mallado puesto que la rotura salvo el caso de algún defecto, que se pudo comprobar que no era el caso, se debe producir en la zona de máximas tensiones.

## **6. CONCLUSIONES.**

Se ha diseñado y puesto en marcha un dispositivo de ensayo de fatiga combinada de alto y bajo número de ciclos (HCF-LCF) que permite una aproximación adecuada a las sollicitaciones presentes en los álabes de la turbina. Este desarrollo permite un considerable avance en el conocimiento de la vida a fatiga de los materiales de estos componentes.

Se constató la gran importancia de la fase de diseño para el logro del éxito ambicionado, así como su retroalimentación con los datos experimentales.

Se detectaron las dificultades que presenta el control en un sistema con sollicitaciones en forma de vibraciones.

Se comprobó que es posible realizar un control preciso de un sistema usando Lab-view.

Este desarrollo permite la apertura de nuevos diseños que permitan un mayor acercamiento a las cargas que se aplican en la realidad. Mejoras en el conocimiento de las cargas que soportan los componentes, unidos a estos desarrollos, pueden constituir en el futuro un importante avance en la consecución de un mejor conocimiento del

comportamiento de los materiales a fatiga. Este logro puede representar importantes ahorros.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean agradecer a la empresa Rolls Royce la ayuda recibida para la puesta en marcha del banco de ensayos y a todos los participantes en el proyecto RAMGT por su colaboración.

## **REFERENCIAS**

[1] Proyecto GRD1-1999-10490 Robust Airfoils for Modern Gas Turbines RAMGT.