

M. González-Gallego^a, F. Terroba^b, M. Frövel^c, Carolina Moravec^d, J.L. Martínez^e y M.C. Serna^e

^a Departamento de Tecnología y Ensayos, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), El Pardo-Madrid, 28048, España

^b Centro I+D Aeronáutico, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Torrejón de Ardoz (Madrid), 28850, España

^c Departamento de Estructuras y Materiales, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Torrejón de Ardoz (Madrid), 28850, España

^d Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España S.A., Isdefe, Calle Beatriz de Bobadilla, 3, Madrid, 28040, España

^e Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales (INEI), Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, 13071, España

Ensayos biaxiales sobre sensores de fibra óptica basados en redes de Bragg

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 31 de Mayo 2019

En la versión revisada 31 de Mayo 2019

Aceptado Mayo 2019

Accesible online Mayo 2021

Palabras clave:

Ensayos biaxiales

Sensores de fibra óptica

Materiales compuestos

Ingeniería naval

Los sensores de fibra óptica basados en redes de Bragg, ampliamente usados en sistemas de monitorización estructural, son sensores cuyo funcionamiento es perfectamente conocido desde el punto de vista teórico cuando son sometidos a deformaciones en la dirección de la propia fibra. No obstante, las deformaciones transversales tienen efecto en el comportamiento de la fibra óptica como sensor, aunque dicho efecto ha sido menos estudiado y es menos conocido. Cuando un sensor se encuentra embebido en una estructura de material compuesto, su deformación rara vez es unidireccional, debido a la presencia de estados de carga complejos o al efecto que el módulo de Poisson tiene sobre la deformación del propio laminado.

El objetivo del trabajo es someter al sensor a un estado de deformación controlado en los dos ejes del plano principal mediante la aplicación de cargas perpendiculares entre sí. Para ello, se va a realizar una campaña de ensayos biaxiales sobre probetas de material compuesto con sensores de fibra óptica embebidos. Con esta metodología de ensayos en el plano, se observará la influencia de las deformaciones transversales en los valores de deformación longitudinal medidos por el sensor.

Para la realización de los ensayos biaxiales se ha utilizado una máquina de ensayos que permite controlar las cargas aplicadas en las tres direcciones espaciales de forma independiente y un equipo de medición de deformaciones mediante correlación digital de imagen (CDI). De esta forma, se realizará una caracterización del sensor antes dicho bajo un estado de cargas.

Biaxial testings with fiber optic sensors based in Bragg gratings

ABSTRACT

Keywords:

Biaxial Testings

Optical fibers sensors

Composites

Naval engineering

Bragg Grating based optical fibre sensors are widely used for structural monitoring. Its operation is theoretical well known when deformations are measured along the fibre axes. Nevertheless, transverse deformations of the optical fibre have an effect that affects the performance of the sensors. This transverse effect has not been so deeply studied as the longitudinal and it is less known. When a sensor is embedded in a composite structure, its deformation is rarely unidirectional because of the presence of complex loads cases and/or the Poisson module effect on the deformation of the lamination.

A test campaign of biaxial composite material specimens with embedded fibre optic sensors is going to be performed. The work pursues to create controlled deformation cases to the sensor in the two main axes of its plane, by means of perpendicular loads in each axis. Following this test methodology in the plane, it will be observed the influence of the transverse deformations on the values of the longitudinal deformation measured by the sensors.

To carry out the biaxial tests it has been used equipment that allows the control of the applied load in the three coordinate axes independently. It also been used a digital image correlation (DIC) equipment for measuring the deformations. Characterization of the sensors will be carried out with different load case tests.

1 Introducción

La Subdirección General de Sistemas Navales (SGSN) del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas" (INTA), se encuentra inmerso en una línea de investigación basada en la monitorización de esfuerzos estructurales en cascos de modelos de buques (fabricados de material compuesto) con sensores de fibra óptica en redes de Bragg de difracción (FBGs). Se trata de un trabajo de investigación, en el que colaboran distintos departamentos del INTA y el Grupo de Mecánica de los Medios Continuos, Ingeniería de Estructuras y de Materiales (COMES) de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM).

El Centro de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR) se enmarca en el mapa de Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares (ICTS) dentro de la red MARHIS, como centro de investigación de ingeniería naval. Su apuesta por el uso de materiales compuestos avanzados en la construcción de modelos de carenas, permite dar un paso más allá de la hidrodinámica: el conocimiento del comportamiento mecánico estructural (deformaciones y tensiones) en tiempo real y en cualquier situación de la vida operativa del barco.

Para ello, se opta por aplicar tecnologías basadas en FBGs, con el fin de detectar posibles daños y cambios en la estructura del casco debido a factores internos y externos de servicio, que permitan realizar estudios técnicos de rediseño para incrementar su seguridad y vida útil, así como obtener una automatización del mantenimiento y una reducción de costes operativos.

2 Plan de ensayos

En el presente artículo, se expone el plan de ensayos que se ha seguido con el fin de caracterizar el comportamiento de sensores de fibra óptica en redes de Bragg, para estados de carga biaxiales de un diseño de probeta cruciforme. El material utilizado en nuestros ensayos es cinta unidireccional de material compuesto reforzado con fibra de carbono de 200 gr/m² (del fabricante Gurit) con resina epoxi *Ampreg 26*.

Se opta por este tipo de material así como de sus características técnicas, al ser usado comunmente en estructuras monolíticas navales. Inicialmente y como antecedente de esta investigación, se ha caracterizado el material mediante ensayos uniaxiales a tracción, compresión y cortadura. El modo de fabricación ha sido manual por vía húmeda, aplicando dos estados de acondicionamiento, "seco" y "saturado" con 85%HR-55°C (condiciones de ensayo de los modelos en canales de experiencias o de mar abierto).

Las probetas cruciformes ensayadas, han sido diseñadas por el Grupo de Investigación COMES de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de Ciudad Real¹ (Figura 1). Sus características son las siguientes:

- Laminados "Cross ply" de 20 capas.
- Configuración del laminado: $[0^\circ, 90^\circ]_s$.
- Ancho de brazos: 30 mm.
- Largo de brazos: 135 mm hasta el centro de la probeta.

- Radios de acuerdo contorno exterior: 7,5 mm y 15 mm.
- Cajeadado en la zona central de la probeta de dimensiones 30 x 30 mm, con esquinas redondeadas de radio 5 mm y reducción de 1 mm/escalón en X e Y.
- En la zona central está formada por 10 capas (5 capas a cada lado del plano de simetría).
- En los extremos de los brazos, se adhieren tacones o "end-tabs" de fibra de vidrio, para el amarre de las mordazas de la máquina triaxial (espesor \approx 1 mm).
- Espesor de capa curada \approx 0,30 mm.



Figura 1. Diseño de probeta cruciforme en CAD. Fuente: INTA-UCLM.

Los sensores FBGs han sido embebidos en la capa de simetría de dichas probetas. Se han dispuesto de tres tipos de sensores, dependiendo del tipo de recubrimiento (poliimida, ormocer y acrílico), colocados longitudinalmente en una sola dirección y separados entre ellos 5 mm, pasando el sensor intermedio por la zona central de la probeta. En los terminales resultantes se han instalado sus correspondientes conectores para ser introducidos en el interrogador marca *HBM*, cuyo fin es registrar las señales resultantes de los distintos estados de cargas. Se ha optado por introducir diferentes recubrimientos para analizar su posible influencia en los resultados con el material, al estar embebido. Nótese que la fibra óptica tiene un diámetro de 160, 220 ó 250 micras de diámetro respectivamente, dependiendo si es poliimida, ormocer o acrílico.

El objetivo que se persigue es obtener el comportamiento mecánico estructural en el campo de tensiones y deformaciones en la zona central de la probeta, a través de la tecnología FBGs para su caracterización y posterior aplicación en modelos de buques fabricados de material compuesto. Para ello, se ha utilizado la máquina triaxial de la ETSII de Ciudad Real y se ha comparado con otras tecnologías de medición: Correlación Digital de Imágenes (DIC) y extensometría.



2.1 Proceso de laminado y fabricación

La metodología y proceso de laminado y fabricación de las probetas, ha sido desarrollada en los laboratorios del Área de Materiales Compuestos de la Subdirección General de Sistemas Aeronáuticos (SGSA) del INTA.

Para la ejecución de las distintas operaciones, se han seguido las instrucciones preventivas en ámbito laboral de dicho centro. Para la preparación del tejido seco y de la resina, se facilita los patrones de corte de cada una de las láminas, el número de láminas, el material de cada lámina y la secuencia de apilamiento.

Las plantillas de corte utilizadas son de medida de 350 x 350 mm, dejando una distancia aproximadamente de 50 mm entre el orillo y el borde de la lámina, ya que el borde del tejido no es útil. En su corte, se ha precisado en evitar la distorsión del mismo y distribuir lo más homogéneamente posible la resina, mediante espátulas (Figura 2 y 3).



Figura 2. Impregnación manual del tejido en el laboratorio de Materiales Compuestos. Fuente: INTA.



Figura 3. Corte manual de las láminas con plantillas de celulosa. Fuente: INTA.

Las condiciones de climatización ambiental del laboratorio, para los proceso de mezcla, impregnación y laminación se

deben encontrar en el intervalo entre 18°C y 25°C, siendo la humedad relativa máxima admisible del 70%.

Partiendo del gramaje de nuestro tejido unidireccional (200gr/m²), se calcula un contenido en peso de resina del 50%, evitando su empleo una vez transcurridos el 80% de su tiempo de vida útil. La vida útil de la resina de estudio formulada con el endurecedor lento, para una mezcla de hasta 500 gramos y temperatura de 20°C es de 2 horas y 45 min, mientras que a 30°C es de 1 hora y 15 min.

En la preparación de la mezcla, tanto la resina como el endurecedor mantienen la temperatura ambiente del laboratorio, evitando cualquier traza de suciedad y humedad. Las proporciones en cantidad de la mezcla se han medido con una balanza de precisión, con una desviación máxima del 2% de las cantidades fijadas.

El proceso de mezcla ha sido cuidado, evitando agitaciones rápidas, siendo el tiempo de mezcla no superior a 5 min para mezclas de 250 gramos. Una vez que la resina ha sido mezclada, se ha impregnado nuestro tejido, siendo extendido con una espátula de manera uniforme, vertiendo el 80% ±5% de la mezcla. Sus movimientos de impregnación han sido desde el centro de la lámina hacia los bordes o extremos con una presión suave, para evitar posibles abolsamientos de la cinta y deterioro del material. Finalizado la impregnación, se deja un tiempo de 5 min para favorecer la evacuación de volátiles, en el que a continuación se coloca una lámina de desmoldeante para poder ser cortado según plantillas de diseño.

En cuanto al proceso de apilado, con una precisión de ±5% en relación con la nominal, la orientación ha sido la siguiente:

[0°,90°,0°,90°,0°,90°,0°,90°/90°,0°,90°,0°,90°,0°,90°,0°,90°,0°]

Por cada apilado de 5 láminas, se ha realizado un proceso de compactación en vacío (250 - 400 mbar) con una duración aproximada de 20 min. En la capa de simetría, se han instalado los tres sensores de fibra óptica FBGs con recubrimientos, en los que quedarán embebidos al apilarse las 10 capas simétricas resultantes (Figura 4). Los cables salientes por dos de los brazos de las probetas, son enrollados y encapsulados con paneles de cera, como protección de los mismos en los distintos procesos de curado, así como en el mecanizado de la probeta en la máquina fresadora (Figura 5).



Figura 4. Colocación de los sensores de FBGs en el proceso de apilado. Fuente: INTA.



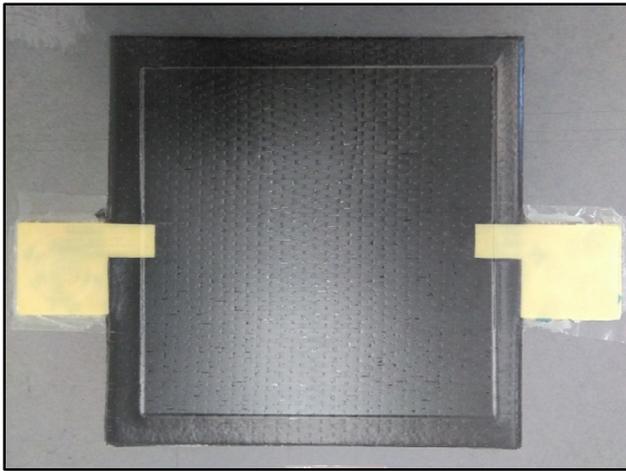


Figura 5. Colocación de los sensores de FBGs en el proceso de apilado. Fuente: INTA.

Por último, se ha realizado un proceso de curado y post-curado. El proceso de curado ha consistido de un vacío continuo entre 700 – 800 mm Hg en una sala a temperatura de 20°C, durante un tiempo de 36 horas. Después, se ha realizado un proceso de curado en estufa de circulación hasta una temperatura de 50°C, con una rampa de pendiente máxima de calentamiento de 3°C/min y manteniendo una meseta isotérmica a $50\pm 5^\circ\text{C}$, por un tiempo de 16 horas. Se han dejado enfriar los paneles dentro de la estufa hasta temperatura ambiente, antes de manipularlas.

3 Fabricación asistida por computador y mecanizados de fresa

El mecanizado de las geometrías de la probeta de diseño, se ha realizado a través de un software de diseño CAM (Mastercam) del Departamento de Tecnología y Ensayos de la SGSN del INTA. Para ello, se han planteado distintos programas de fresado, siendo principal dos: contorneado de los límites exteriores de la probeta y una caja en movimiento de espiral para los cajeados centrales.

Las herramientas utilizadas han sido: una broca de 5 mm de diámetro, para los taladros de fijación en el útil-bancada, una fresa esférica de 8 mm de diámetro para el cajeadado central y una fresa plana de 10 mm de diámetro para los contornos (figuras 6 y 7).



Figura 6. Panel de CFRP colocado en útil-bancada de la fresadora. Fuente: INTA.

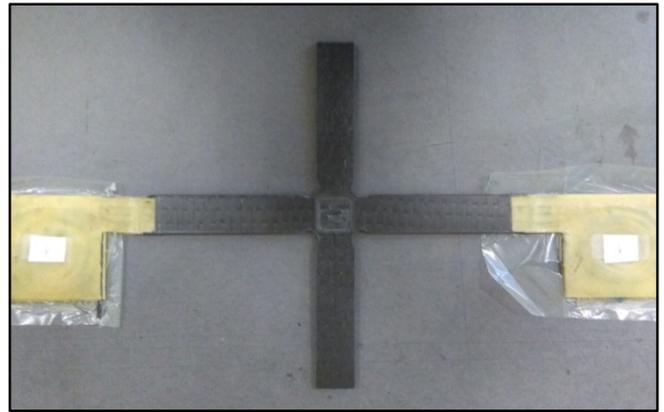


Figura 7. Probeta cruciforme mecanizada con sensores FBGs embudidos. Fuente: INTA.

Una vez finalizado el proceso de mecanizado de las mismas, se ha procedido a su digitalización, aplicando un brazo de medición con láser escáner de gran precisión, marca *Hexagon Metrology* de siete ejes (del Dpto. de Tecnología y Ensayos de la SGSN), cuya finalidad ha sido controlar dimensionalmente su acabado, realizando una comparación dimensional entre el CAD de la probeta y la propia probeta mecanizada (figura 8).

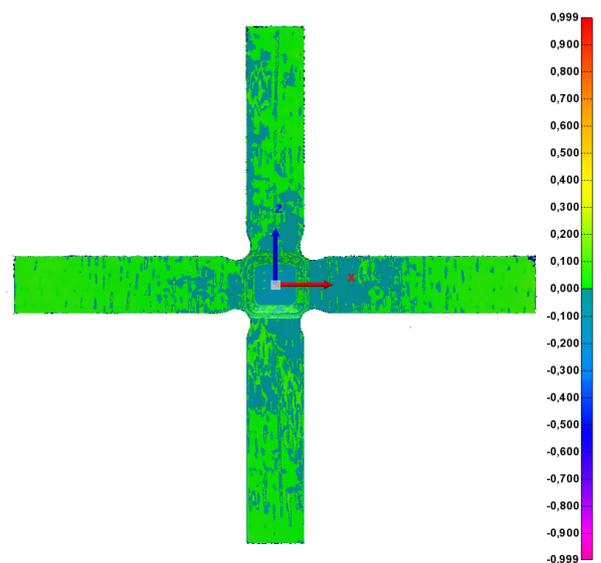


Figura 8. Desviaciones promedio entre la probeta CAD y la probeta real. Fuente: INTA.

4 Equipamiento científico-técnico aplicado

La máquina de ensayos que se ha utilizado es una máquina triaxial (figura 9), tiene la capacidad de realizar ensayos de tracción-compresión en las tres direcciones del espacio. Consta de un conjunto de seis actuadores electromecánicos enfrentados dos a dos en cada uno de los tres ejes. Estos actuadores se pueden utilizar de forma sincronizada en cualquiera de las tres direcciones del espacio, lo que permite la realización de ensayos uniaxiales, biaxiales y triaxiales en función del tipo de experimento. La capacidad máxima de la máquina es de 50 KN por eje.





Figura 9. Colocación de los sensores de FBGs en el proceso de apilado. Fuente: UCLM.

El sistema de control, medida y adquisición de datos se ha llevado a cabo mediante un programa informático en el cual se pueden programar métodos de ensayo y realizar un tratamiento previo de los datos registrados. También dispone de diversos tipos de mordaza para el acoplamiento de la probeta a la máquina.

El sistema de medida de los parámetros de interés en cuanto a comportamiento mecánico se refiere (tensiones y deformaciones), son: interrogadores de fibra óptica cuasi-distribuida marca HBM y un equipo de correlación digital de imágenes (DIC).

5 Conclusiones

Esta línea de investigación apuesta por el empleo de materiales compuestos y la monitorización a nivel estructural de los modelos de buques de ensayos en el ICTS-CEHIPAR. Estos estudios estructurales junto con la dilatada experiencia en hidrodinámica, va a permitir analizar la interacción fluido-estructura en modelos, que tendrán gran importancia en los futuros desarrollos de buques. Además, estas investigaciones presentan grandes sinergias con distintos departamentos del INTA y del Grupo COMES de la ETSII de Ciudad Real, así como de otros Organismos de Investigación nacional e internacional.

6 Referencias

(1) M.C. Serna Moreno, J.J. López Cela. *Composites Science and Technology* 72 (2011) 91-96.

