

## MONITORIZACIÓN DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE UN MATERIAL COMPUESTO MEDIANTE SENSORES FBGS

M. González-Gallego<sup>\*1, 2</sup>, J. L. Martínez<sup>2</sup>, F. Terroba<sup>1</sup> y M. Frövel<sup>3</sup>

1. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Campus de El Pardo. Madrid (España)

2. Universidad de Castilla-La Mancha, ETS de Ingeniería Industrial. Ciudad Real (España)

3. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Campus de Torrejón. Madrid (España)

[\\*gonzalezgm@inta.es](mailto:*gonzalezgm@inta.es)

**Resumen:** En este trabajo se presenta la campaña de ensayos biaxiales llevada a cabo con el fin de caracterizar la influencia de cargas transversales en los sensores de fibra óptica en redes de Bragg (FBGS) con diferentes materiales de recubrimiento. Para la caracterización de los sensores FBG se ha optado por un diseño de probeta con geometría cruciforme, como medio material estructural de análisis del campo de deformaciones. En estas probetas, los sensores se han colocado en la zona central, alineada con dos de los brazos y perpendicular a los otros dos. Los ensayos biaxiales se han prolongado hasta alcanzar el 70% de la carga máxima soportada por el material compuesto, con el que está fabricada la probeta cruciforme. Las probetas ensayadas se han laminado a partir de tejido unidireccional reforzado con fibra de carbono y resina epoxi, utilizado en estructuras monolíticas navales. Este proyecto de investigación se enmarca en el Convenio de colaboración existente entre INTA y la UCLM.

**Palabras clave:** Materiales Compuestos, Ensayos Biaxiales, SHM, Fiber Bragg Gratings Sensor.

### 1. INTRODUCCIÓN.

La Subdirección General de Sistemas Navales (SGSN) del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) se encuentra en el Centro de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR), considerado como Infraestructura Científica y Técnica Singular (ICTS). Además de la hidrodinámica, en este centro existe una línea de investigación aplicada a la industria naval y centrada en el estudio de materiales compuestos. Esta línea persigue la monitorización estructural en cascos de modelos de buques fabricados en materiales compuestos con FBGS. En este sentido, la implementación de técnicas de instrumentación para la monitorización de esfuerzos en dichos materiales es necesaria para detectar posibles daños debidos a diferentes causas que pueden ocurrir a lo largo de su vida útil. De tal manera, los resultados obtenidos en los ensayos a escala permitirán aplicar a buques reales las metodologías de fabricación e instrumentación estudiadas, con el fin de incrementar su seguridad y optimizar su mantenimiento. En este trabajo se han caracterizado los FBGS a nivel de laboratorio, para estudiar la influencia en las señales de salida de los sensores de cargas transversales ante un estado biaxial cuasi-estático. Para su estudio, se han fabricado probetas cruciformes basadas en diseños estudiados anteriormente por el Grupo COMES de la UCLM [1, 2]. Los FBGS instalados han sido embebidos en la capa de simetría del laminado, midiendo el campo de deformaciones en la zona central de la probeta. Se han ensayado cuatro estados de deformación fija en la dirección longitudinal de la fibra (500, 1000, 1500 y 2000 microdeformaciones), variando la deformación transversal en el rango de 0 a 4000 microdeformaciones,

en intervalos de 500. Se han instalado tres sensores FBG con distintos recubrimientos: ormocer, poliamida y acrílico. Por último, se ha realizado una comparativa entre los cuatro estados de deformación longitudinal para cada recubrimiento.

### 2. MOTIVACIÓN.

El conocimiento que se tiene sobre la respuesta de los FBGS se ha obtenido tradicionalmente de forma experimental a través de ensayos estándar uniaxiales de tracción, con FBGSs adheridos a la superficie o embebidos, con y sin recubrimiento, aplicando un factor de corrección  $K$  dependiente de la naturaleza mecánica del material [3,4]. En el cálculo de este factor de corrección  $K$  se ha obviado la influencia de las cargas transversales en la longitud de onda de Bragg (ver figura 1). Pero no existen suficientes trabajos sobre la caracterización de estos sensores ante cargas biaxiales, así como la influencia del material de recubrimiento en la respuesta del sensor.

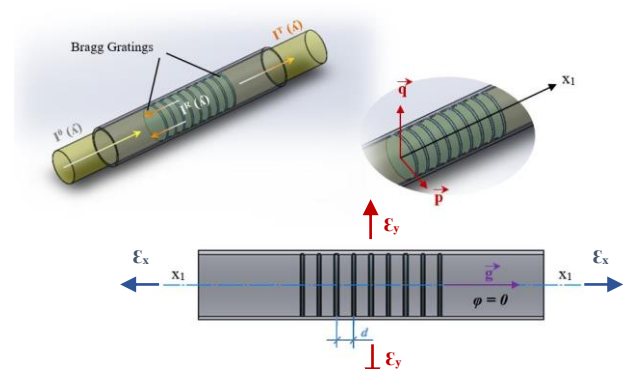
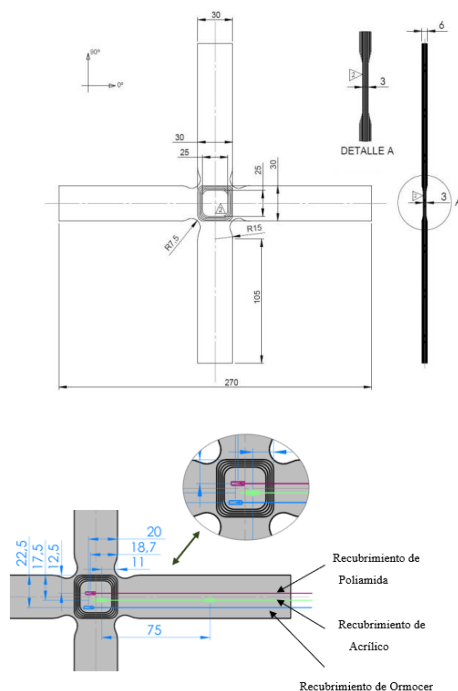


Figura 1. Esquema de un FBGS.

### 3. MATERIAL, SENSORES Y PROBETAS.

El laminado de CFRP se ha realizado por vía húmeda en el laboratorio de Materiales Compuestos del INTA. Se ha utilizado cinta unidireccional UTC-200 g/m<sup>3</sup> y resina epoxi Ampreg-26 con una configuración de laminado simétrico cuasi-isótropo [0, 90]<sub>s</sub> de 20 capas. Cada cinco láminas, se ha realizado un proceso de compactación en vacío (250 – 400 mbar) con una duración aproximada de 20 min. Por último, se ha realizado un proceso de curado y postcurado. El proceso de curado ha consistido en 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 ± 5 °C, por un tiempo de 16 horas. Se han dejado enfriar los paneles dentro de la estufa hasta temperatura ambiente, antes de manipularlas. Una vez curados los paneles, se ha realizado el mecanizado de las probetas en una fresadora. Durante el laminado, en el plano de simetría, se han embebido tres FBGSs con recubrimiento de ormocer, poliamida y acrílico instalados en la capa de simetría, con unos diámetros de 220, 160 y 250 µm respectivamente (Figura 2). El mecanizado por CNC ha consistido en la obtención de la zona de mecanizado de la zona central de la probeta por ambas caras y de un contorneado exterior, según diseño de la probeta (figura 2). Para finalizar y antes de realizar los ensayos, se ha procedido a su digitalización, aplicando un brazo de medición láser escáner de gran precisión, marca *Hexagon Metrology* de siete ejes del INTA, cuya finalidad ha sido controlar dimensionalmente su acabado, entre el CAD de la probeta y la propia probeta mecanizada.

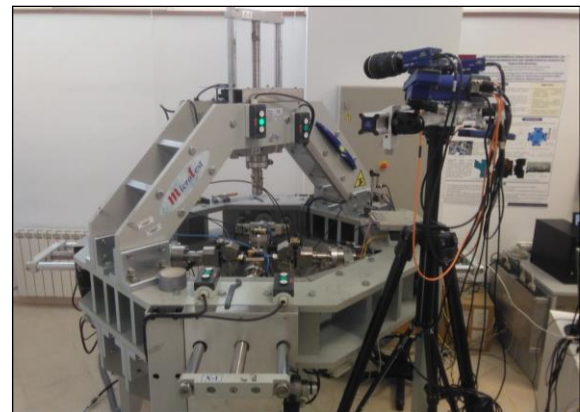


**Figura 2.** Geometría de la probeta y distribución de los FBGS.

### 4. EQUIPO DE ENSAYOS.

En cuanto al equipamiento experimental, se ha utilizado una máquina triaxial, equipamiento de extensometría (galgas extensométricas y caja de extensometría marca KYOWA), un interrogador de fibra óptica cuasi-distribuida marca HBM y un sensor extrínseco (videoextensómetro).

La máquina de ensayos triaxial de la ETS de Ingeniería Industrial de Ciudad Real, 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 3.** Máquina triaxial de la ETS de Ingeniería Industrial de Ciudad Real, UCLM.

### 5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

A continuación, se muestran las gráficas de los cuatro estados de deformación longitudinal ensayados (500, 1000, 1500 y 2000 microdeformaciones). Antes de iniciar los ensayos biaxiales, se ha adherido una de las caras de la probeta una galga extensométrica como sistema de referencia de las mediciones (figura 4). En las siguientes gráficas, las curvas de color rojo representan a las deformaciones longitudinales y las curvas de color azul a las deformaciones transversales. (figura 5).



**Figura 4.** Instalación de la galga extensométrica en la probeta ensayada.

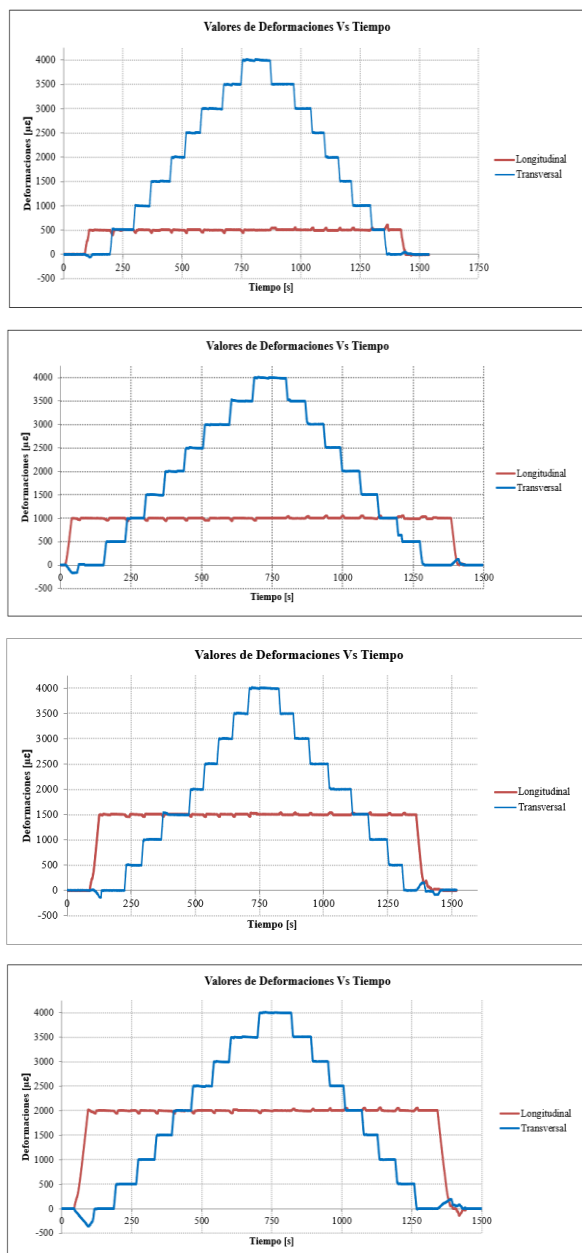


Figura 5. Estados de deformación ensayados.

En la Figura 6 se representa el comportamiento de los tres tipos de sensores de fibra óptica en uno de los ensayos realizados.

En las Tablas 1-4 se muestran, para cada estado de carga, la variación de longitud de onda de Bragg, expresada en picómetros y su equivalencia en microdeformaciones. Su conversión a unidades de deformación ( $1 \mu\epsilon \sim 1,2 \text{ pm}$ ) se encuentra justificada por estudios realizados en materiales transversalmente isótropos ante cargas uniaxiales [3, 4]. Nótese que en la Tabla 1 se han expuestos los valores máximos obtenidos en los ensayos realizados para este estado de carga. Se observa que los valores obtenidos en las Tablas 2, 3 y 4, correspondientes a los estados de carga 1000, 1500 y 2000 microdeformaciones, presentan una dispersión más estable en el rango de 10 – 20 %.

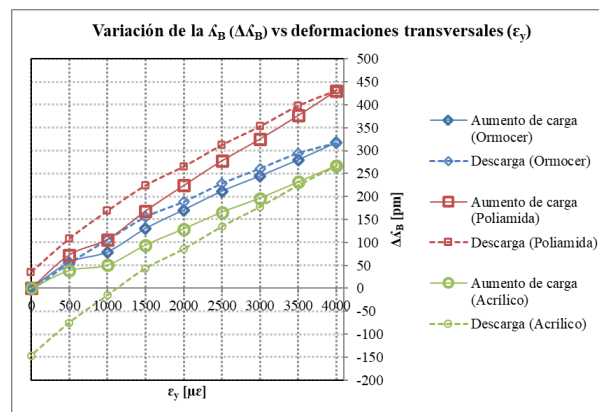


Figura 6. Comportamiento de los FBGS.

Tabla 1. Estado de deformación de 500  $\mu\epsilon$ .

| $\lambda_B=1,2\text{pm} \sim 1\mu\epsilon$ | pm  | $\mu\epsilon$ | Influencia % |
|--|-----|---------------|--------------|
| ORMOCER                                    | 305 | 255           | 50,9         |
| POLIAMIDA                                  | 368 | 306           | 61,3         |
| ACRÍLICO                                   | 291 | 243           | 48,6         |

Tabla 2. Estado de deformación de 1000  $\mu\epsilon$ .

| $\lambda_B=1,2\text{pm} \sim 1\mu\epsilon$ | pm  | $\mu\epsilon$ | Influencia % |
|--|-----|---------------|--------------|
| ORMOCER                                    | 250 | 208           | 20,8         |
| POLIAMIDA                                  | 221 | 184           | 18,4         |
| ACRÍLICO                                   | 197 | 164           | 16,4         |

Tabla 3. Estado de deformación de 1500  $\mu\epsilon$ .

| $\lambda_B=1,2\text{pm} \sim 1\mu\epsilon$ | pm  | $\mu\epsilon$ | Influencia % |
|--|-----|---------------|--------------|
| ORMOCER                                    | 209 | 174           | 11,6         |
| POLIAMIDA                                  | 253 | 211           | 14,0         |
| ACRÍLICO                                   | 139 | 116           | 7,7          |

Tabla 4. Estado de deformación de 2000  $\mu\epsilon$ .

| $\lambda_B=1,2\text{pm} \sim 1\mu\epsilon$ | pm  | $\mu\epsilon$ | Influencia % |
|--|-----|---------------|--------------|
| ORMOCER                                    | 308 | 257           | 12,8         |
| POLIAMIDA                                  | 278 | 231           | 11,6         |
| ACRÍLICO                                   | 189 | 158           | 7,9          |

## 6.- CONCLUSIONES.

De este estudio se extraen las siguientes conclusiones para FBGS con recubrimientos ormocer, poliamida y acrílico, ante un estado de cargas biaxiales cuasi-estático en el plano:

- La longitud de onda de Bragg aumenta al aplicar cargas transversales de tracción, siendo constante la carga longitudinal.
- Los valores de salida observados en los FBGS dependen del material de recubrimiento. Al analizar los ensayos tanto en carga como en descarga, se observa el fenómeno de histéresis en los tres sensores, siendo éste más pronunciado en el recubrimiento acrílico. También se observa que el recubrimiento de acrílico tiene una menor influencia ante cargas transversales frente al material de ormocer y de poliamida.
- En la campaña de ensayos de 500 microdeformaciones (en el intervalo de menor deformación longitudinal), la influencia en tanto por ciento es muy elevada. Los resultados obtenidos tienen una acusada dispersión. Esta dispersión se debe a la importante diferencia de deformación generada en la dirección longitudinal frente a la transversal. En términos generales, para el rango de deformación estudiado, se ha obtenido una influencia en la carga transversal del 10 – 20 %.

## 7.- REFERENCIAS.

- [1] Serna Moreno, M. C. y otro (2011). “Failure envelope under biaxial tensile loading for chopped glass-reinforced polyester composites”, *Composites Science and Technology*, Elsevier.
- [2] Serna, M.C. y otros (2013). “Failure strain and stress fields of a chopped glass-reinforced polyester under biaxial loading”, *Composite Structures*, 103, 27-33.
- [3] Van Steenkiste, R. J. y otro (1997). “Strain and Temperature Measurement with Fiber Optic Sensors”, *Technomic Publishing Company*.
- [4] Frövel, M. (2006). “Sensores de fibra óptica tipo redes de Bragg embebidos en material compuesto para medir deformaciones y temperaturas criogénicas”, Tesis Doctoral, UPM. Madrid.